جون جريبين

البساطة العميقة

(الانتظام فى الشواشى والتعقد)

عرض : د. صبحى رجب

سلسلة دراسات « عروض »

إجتهادات حديثة حول العلم والمستقبل

ISO 9002

المكتبة الأكاديمية
شركة مساهمة مصرية - القاهرة

كراسات « عروض »

سلسلة غير دورية تصدرها المكتبة الأكاديمية

تعنى بتقديم اجتهادات حديثة حول العلم والمستقبل

رئيس التحرير أ.د. أحمد شوقى   مدير التحرير أ. أحمد أمين

المراسلات :

المكتبــة الأكاديميــة

شركة مساهمة مصرية

رأس المال المصدر والمدفوع ١٨,٢٨٥,٠٠٠ جنيه مصرى

١٢١ شارع التحرير - الدقى - الجيزة
القاهرة - جمهورية مصر العربية
تليفون : ٧٤٨٥٢٨٢ - ٣٣٦٨٢٨٨ (٢٠٢)
فاكس : ٧٤٩١٨٩٠ (٢٠٢)

المكتبة الأكاديمية
شركة مساهمة مصرية
الحاصلة على شهادة الجودة
ISO 9002
Certificate No.: 82210
03/05/2001

UKAS
QUALITY
MANAGEMENT

البساطة العميقة

(الانتظام فى الشواش والتعقد)

البساطة العميقة

(الانتظام فى الشواشى والتعقد)

المؤلف

جون جريبين

عرض

د. صبحى رجب عطا الله

الناشر

المكتبة الأكاديمية

شركة مساهمة مصرية

٢٠٠٧

هذه الكراسة تقدم عرضًا تفصيليًا لكتاب:

Deep Simplicity

John Gribbin, 2004.

بطاقة فهرسة الكتاب:

جريبين، جون

البساطة العميقة : الانتظام فى الشواش والتعقد/ جون جريبين ، عرض صبحى رجب عطاالله .- ط١ . - القاهرة - المكتبة الأكاديمية، ٢٠٠٦

١٣٢ ص ، ٢٧ سم .- (كراسات عروض)

تدمك ٦-٣١٠-٢٨١-٩٧٧

١ - العلوم - فلسفة

أ - عطاالله ، صبحى رجب (عرض)

ب - العنوان

٥٠١

رقم الإيداع ٢٠٧٥٣/٢٠٠٦

حقوق النشر

الطبعة الأولى ٢٠٠٧م - ١٤٢٧هـ

المكتبة الأكاديمية

شركة مساهمة مصرية

رأس المال المصدر والمدفوع ١٨,٢٨٥,٠٠٠ جنيه مصرى

١٢١ شارع التحرير - الدقى - الجيزة

القاهرة - جمهورية مصر العربية

تليفون : ٧٤٨٥٢٨٢ - ٣٣٦٨٢٨٨ (٢٠٢)

فاكس : ٧٤٩١٨٩٠ (٢٠٢)

هذه السلسلة

هى الثالثة فى مشروع « الكراسات » ، الذى تصدره « المكتبة الأكاديمية » . والكراسات تعنى بمحورين كبيرين : العلم والمستقبل، لذلك فقد حملت السلسلة الأولى عنوان « كراسات مستقبلية » ، وقد بدأ ظهورها عام ١٩٩٧ ، وفى عام ١٩٩٨ ظهرت السلسلة الثانية تحت اسم « كراسات علمية » . وقد فكرنا فى البداية أن تضم السلسلتين ، بجانب التأليف والترجمة ، عروضا مطولة لبعض الإصدارات المهمة ، التى لا تلاحقها حركة الترجمة، إلا أن أنشط أعضاء أسرة الكراسات ، وللكراسات أسرة ممتدة ترحب دائماً بالأعضاء الجدد ، أقول إن أنشط الأعضاء الصديق الدكتور محمد رءوف حامد ، الأستاذ بهيئة الرقابة الدوائية ، اقترح أن تصدر العروض فى سلسلة خاصة بها . وقد كان اقتراحاً موفقا،كما أرجو أن يوافقنى القارئ .

والكتب المختارة للعرض فى السلسلة لا تأتى فقط من اقتراحات هيئة التحرير ، حيث قدم أعضاء الأسرة مقترحاتهم التى حظيت بالترحيب، فالباب مفتوح لكل من يرغب فى المشاركة . وإذا كانت السلسلة قد بدأت بمجموعة من الكتب الصادرة بالإنجليزية ، فإننا نطمح أن تشمل العروض القادمة كتبا تصدر فى لغات أخرى ، لا تشملها عادة خطط الترجمة كاليابانية والروسية والصينية ، بالإضافة إلى الفرنسية والألمانية . فرغم أن الأخيرتين أكثر حظاً نسبياً ، إلا أن كم المترجم والمعروض لايقارن بما يتم بالنسبة للإنجليزية .

والحديث عن « العروض » يذكرنا بالجهود السابقة ، التى لا ننكرها ، بل نحاول أن نكمل مسيرتها . فبالنسبة للعروض الموسعة ، تذكر جهود الهيئة العامة للاستعلامات بالنسبة للمجالات التى تهمها . كما أن العروض المتوسطة ، التى أصدرتها هيئة الكتاب فى التسعينيات ، ضمن سلسلة « تراث الإنسانية » لايمكن إغفالها . وهما مثالان يقصد بهما الاعتراف بفضل السبق ، دون أن ندعى الحصر . وإن كنا ، فى الوقت نفسه ، نظن أن السلسلة الحالية هى الأولى التى تعنى بالعرض التفصيلى للكتب .

هذه الكراسة :

لماذا تحدث اختناقات المرور دون سبب ظاهر؟ هل يمكن التنبؤ بالزلازل الكبيرة؟ كيف تتطور الأنواع؟ من أين أتت المجرات؟ ما هو سبب ظهور الحياة على الأرض؟ ماذا لو كانت الإجابة لكل هذه الأسئلة واحدة؟

على مدى العقدين الماضيين، لم يكن لأى مجال علمى منفرد تأثير صاعق على مدى واسع من المجالات العلمية الأخرى من علوم الحياة إلى الفيزياء، من علوم الحاسب إلى التنبؤات الجوية مثل هذا التأثير الذى أحدثه علم الشواش والتعقد - أى دراسة النظم المعقدة - يقوم جون جريبين - عالم الفيزياء الفلكية - بخبرته المتميزة بالكشف عن جوهر وروعة فرع من أفرع العلم الحديثة جدا، وهو الفرع الخاص بالمبادئ التى تحكم الشواشى والتعقد، وبلغة عالية البلاغة والجمال. يظهر فى هذا الكتاب دور هاتين النظريتين الثوريتين فى تفسير تلك الظواهر المتباينة من تغيرات الطقس إلى الكوارث الطبيعية التى تؤدى إلى الموت الجماعى لبعض الأنواع.

وفى هذا العرض المتميز لكتاب جريبين «البساطة العميقة»، بذل الدكتور صبحى رجب جهداً لا يقل تميزا فى تقديم مادته لقراء العربية، لتوضيح الجبهة العريضة التى يستخدم فيها الشواش والتعقد فى فهم العالم، باعتبار أن هذا الفهم هو هدف العلم. وباسم مشروع «كراسات العلم والمستقبل» نشكره ونطالبه بالمزيد.

أ.د. أحمـــد شوقـــى

يناير ٢٠٠٧

مقدمة:

لقد أقلقنى دائما أنه، وطبقا للقوانين كما نفهمها الآن، تحتاج الآلة الحاسبة عددا لا نهائياً من الخطوات المنطقية حتى تحسب ما يحدث فى منطقة متناهية الصغر فى الفراغ وكذلك فى فترة متناهية الصغر فى الزمن. كيف يحدث كل هذا فى هذه المنطقة الصغيرة جدا من الفراغ؟ لماذا يتطلب هذا عددا لا نهائياً من الخطوات المنطقية لكى نعرف ماذا يحدث فى منطقة صغيرة جداً من الفراغ/الزمن؟ كنت دائما أفترض أن الفيزياء بالضرورة لا تحتاج لمنطوق رياضى، وفى النهاية سوف نكشف عن الميكانيكية التى تسير بها الأمور، وأن القوانين سوف تكون بسيطة مثل رقعة الضامة رغم أنها تبدو شديدة التعقيد.

رتشارد فانيمان فى كتاب (طبيعة القانون الفيزيائى)

لا تقاس بساطة الطبيعة بمقدار تصورنا لها. إن ظواهرها لا نهائية ولكنها بسيطة في أسبابها، وتتجلى حكمتها فى العدد الهائل من الظواهر، عادة شديدة التعقيد كنتيجة لعدد صغير من القوانين العامة.

بيير لابلاس (١٧٤٩ - ١٨٢٧م)

(الكشف عن نظم الخلق)

المحتـــويات

مقدمة :

بساطة التعقد

الشواش، التعقد والحياة

إن الحياة وبالتحديد أصل الحياة هو أعظم الأسرار، ليس فقط فى العلم وإنما على الإطلاق.

إن موضوع هذا الكتاب يدور حول الاكتشافات التى تجعل هذا السر أقل غموضا فى القرن الواحد والعشرين. إنه يعالج الأسئلة المتعلقة بكيف جئنا إلى هنا وأصبحنا كما نحن الآن، ويعطى على الأقل إجابات جزئية عن مثل هذه الأسئة. من السهل رؤية العلاقة بين الحياة والتعقد والبشر، وخاصة أن البشر هى كائنات شديدة التعقيد. لكن ماهى العلاقة بين الشواش والحياة؟ إن الحياة مبنية على أنها منظمة بحيث تستفيد من المصادر المتاحة لصالحها. ولكن ما علاقة الشواش بالحياة؟ خاصة وأن الشواش حسب ما نعلمه هو النزعة إلى الفوضى وعدم الانتظام. ما سوف نكشفه فى هذا الكتاب هو كيف يؤدى الشواش إلى التعقيد وكيف يؤدى التعقيد إلى الحياة. بدون الشواش لم نكن هنا الآن، ولكن الشواش بالنسبة للعالم ليس مثل الشواش بالنسبة للحياة اليومية.

لقد بدأت القصة فى عام ١٩٨٠م حين أصبحت ظاهرة الفراشة(*) معروفة فى سياق اللغة العامة مثلها مثل الثقوب السوداء والقفزة الكمية، ولكن عشرون عاما هى فترة طويلة فى العلم وما هو معروف عن الشواش هو مجرد بداية القصة.

فى ميكانيكا الكم كانت الفترة من ١٩٢٥ - ١٩٤٥م كافية للانتقال من المبادئ الأولى لميكانيكا الكم إلى القنبلة النووية. فى الكيمياء الحيوية، وفى الفترة من ١٩٣٠ - ١٩٥٠م حدث التحول من مجرد معرفة أن الجينات مكونة من الدنا (DNA) إلى اكتشاف تركيب الحلزون المزدوج من الدنا (DNA) . كما نرى أيضا كيف تبدو النماذج الأولى للحاسب الأولى ساذجة بالنسبة للحاسبات الحالية. لم يحدث نفس التطور بالنسبة للشواشى وإن كان قد دخل إلى المفاهيم العامة واستقر.

لابد هنا أن نشير إلى شىء هام جدا حدث فى العلم منذ أيام جاليليو ونيوتن:

(*) تأثير الفراشة: نتيجة للشواش فإنه عندما ترفرف فراشة بأجنحتها فى الصين، يؤدى ذلك إلى إعصار فى أمريكا. يمكن تفسير ذلك أنه فى النظم الشواشية تعتمد النتيجة بشكل كبير جدا على الشروط الابتدائية.

بدأ الاتجاه نحو فهم كيف تعمل الأشياء بدءا من أشياء بسيطة وصعودا نحو الأشياء الكبيرة، على عكس الماضى حيث كان الفكر هو تفكيك الأمور إلى جزئياتها. هكذا تبدو الأمور بأننا نبدأ بدراسة تصادمات الكرات البسيطة ونتدرج إلى الكون ككل بل وأنفسنا أيضاً.

رغم أن العالم حولنا يبدو شديد التعقيد، إلا أن هناك ثوابتاً مثل (تسقط التفاحات دائما على الأرض وليس العكس، تشرق الشمس دائما من الشرق وليس الغرب). مازالت حياتنا رغم كل التقدم التكنولوجى رهينة تفاعلات معقدة تفضى إلى تغيرات درامية فى حياتنا. الزلازل والبراكين وتذبذبات البورصات العنيفة خير مثال على ذلك.

منذ جاليليو فى القرن السابع عشر تقدم العلم بشكل كبير جدا ولكن كان التركيز على الظواهر البسيطة (مثل سقوط التفاحات) وشروق الشمس من الشرق، وتفادى العلم دراسة الظواهر المعقدة أو شديدة التعقيد.

منذ منتصف القرن العشرين يمكن القول بأن العلم فسر الكثير على المستوى الذرى (ميكانيكا الكم) وعلى مستوى الكون (نظرية النسبية العامة)، ولكن ورغم معرفة بنية الدنا (DNA) وكيف ينتقل من جيل إلى جيل آخر، يظل تعقد الحياة نفسها لغزا فى حد ذاته.

فى الواقع فإنه على المستوى الذرى، يكون سلوك الذرات المنفردة وتفاعلها بعضها مع البعض بسيطا، ولكن يبدأ التعقد حين تتجمع الذرات فى تجمعات ضخمة جدا وتنشأ الحياة. ولكن هذه العملية لايمكن أن تمتد إلى مالا نهاية حيث إنه مع إزدياد كتلة الذرات تبدأ الجاذبية فى سحق هذه البنيات الكبيرة. فمثلا جزىء الماء هو بسيط جدا وأبسط بكثير عن بنية الجسم الآدمى كذلك تكون بنية نواة أى كوكب أو نجم أبسط بكثير من بنية الجسم الآدمى، مرة أخرى. لهذا السبب يمكن أن يعطينا العلم إجابة عن سلوك جزىء الماء أو نواة نجم ولكن ليس عن سلوك بنى آدم.

لم يكن للعلماء أن يتوقفوا عن دراسة النظم البسيطة ولكن منذ عام ١٩٦٠م بدأ استخدام الآلات الحاسبة فى دراسة النظم المعقدة.

لقد انتظرت حوالى عشر سنوات حتى يكتب أحد عن الشواش بلغة أستطيع فهمها، ولكن لم يحدث ذلك، فقررت أن أتصدى أنا لهذه المهمة، وبدأت أقرأ كل ما أستطيع الحصول عليه حتى أفهم ما هو الشواش بنفسى. فى النهاية توصلت إلى

صلب القضية وهو أن أى نظام (يمكن أن يكون هذا النظام بندولا بسيطا، المجموعة الشمسية أو حتى نقاط من الماء تتساقط من فوهة صنبور) يتأثر بالشروط الابتدائية والتى تتذبذب كثيرا وهكذا يمكن أن تحدث بها تغيرات ضخمة جدا، فى نفس الوقت تلعب التغذية الخلفية دوراً كبيراً مؤثرة على سلوك النظام وبالتالى على الحالة النهائية التى يمكن أن يصل إليها.

هنا يمكننا القول بأن النظرية النسبية تبنى على مبدأ بسيط جدا وهو أن سرعة الضوء ثابتة لكل الراصدين، وأما الظواهر التى تنتج من هذا نحتاج لرياضيات معقدة لصياغتها وتفسيرها.

وهكذا توصلت إلى بعض الحقائق: أن الشواش والتعقيد يخضعان لقوانين بسيطة مثل تلك التى توصل إليها نيوتن منذ ثلاثمائة عام، وهكذا أمكن تفسير ظواهر معقدة مثل حدوث الزلازل، تقلبات البورصة، النظم المناخية، وحتى البشر (ولكن دون توقع جازم).

أحب هنا أن أستعيد مقولة «مراى جلمان» (Murray Gell-mann) والتى تعكس صدى كلمات فاينمان المذكورة فى بداية الكتاب أى «إن التعقد الذى نراه على السطح ينبع من بساطة عميقة».

«إنها البساطة التى تولد التعقد، مما يجعل الحياة ممكنة».

وهذا هو موضوع الكتاب

چون جريبين

ديسمبر ٢٠٠٤

الباب الأول

الانتظام من الشواش

قبيل الثورة العلمية فى القرن السابع عشر الميلادى، كان الشواش يحكم العالم بشكل يختلف اختلافا كبيرا عن الطريقة التى يستخدمها العلماء الآن لهذا اللفظ. بالطبع لا يوجد قانون بسيط يفسر سلوك الرياح والطقس، حدوث المجاعات أو مدارات الكواكب سوى أنها الإرادة الإلهية (أو الآلهة). لقد ساد الاعتقاد أن الكون متناسق، تدور الكواكب والشمس حول الأرض وهى مركز الكون وكل شىء. كل هذه المدارات دائرية لأن الدائرة أكمل الأشكال.

تسقط الأجسام لأسفل لأنها تتجه نحو مركز الأرض وهو مركز كل شىء وهو أيضا مركز التماثل وبالتالى فهو المكان الذى تتدافع إليه كل الأجسام وتحب أن تستقر به. حتى عندما جرؤ الفيلسوف أرستاركوس (من ساموس) والذى عاش فى القرن الثالث قبل الميلاد، أن يقول إن الأرض تدور حول الشمس كان يُتبع ذلك بأن المدار دائرى الشكل.. وهذه الأمثلة توضح بشكل جلى الفرق الأساسى بين العلوم القديمة والعلوم ما بعد جاليليو.

كان من بين قدماء اليونان علماء رياضيات بارعين وبالأخص فى الهندسة، يفهمون جيدا العلاقات بين الأشكال الثابتة، وظهرت هذه المعرفة بظهور المجتمعات الزراعية من بناء المنازل إلى تقسيم الأرض إلى حقول، ولكن كان ينقص هؤلاء فهم كيف تتحرك الأجسام وقوانين الحركة. يوضح هذا لغز «زينو» الشهير (Zeno) والذى يصف الجندى الذى لا يمكن أن يصيبه سهم؛ حيث إنه يتحرك بمسافة أبعد كلما قرب السهم منه، وهذا اللغز كان يدهش القدماء بشكل كبير.

بقى نموذج الكون الذى يتمركز حول الأرض حتى بعد أن أفصح نيكولاس كوبرنيكس فى عام ١٥٣٩م عن النموذج الآخر الذى يتمركز حول الشمس ولكن مع الاحتفاظ بكل المدارات دائرية الشكل، ولكن مع ظهور أعمال كبلر – بناء على مشاهدات تيكوبراهى – ثبت أن المدارات ليست دائرية وإنما على شكل قطع ناقص، خلافا لكل المعتقدات الراسخة عند قدماء اليونان، ويضاف إلى هذا أن جاليليو كان أول من أدخل مفهوم مقارنة النموذج النظرى مع نتائج التجربة العملية. لقد كان مفتاح أعمال جاليليو حادثة فى عام ١٥٨٣م حين كان يحضر احتفالا فى الكنيسة ولاحظ تأرجح النجفة المعلقة بسقف الكنيسة وقام بمقارنة زمن تأرجح هذه النجفة بنبضات قلبه، ثم توصل جاليليو إلى حقيقة كبرى وهو أن زمن الدورة – أى الزمن

اللازم لكى تكمل النجفة ذبذبة كاملة - يعتمد على طول الحبل الذى يحمل النجفة وليس المسافة التى، تتأرجح فيها النجفة، فاستخدم جاليليو فى التجارب اللاحقة بندولا بسيطا لقياس زمن حركة كرات على أسطح مائلة، وبهذا استطاع جاليليو أن يبلور مفهوم العجلة، وانتهى إلى أن عجلة الجاذبية تساوى ٩,٨٨ متر/ثانية مربعة وهى مقدار ثابت تسقط به كل الأجسام فى مجال الجاذبية الأرضية بصرف النظر عن كتلتها.

أضاف جاليليو رؤية هامة جدا سادت العلم بعد ذلك لما يقرب من أربعة قرون: لقد لاحظ جاليليو أن حركة الكرات تعتمد على مدى خشونة كل من سطحها والسطح المائل الذى تتحرك عليه، واستطاع جاليليو أن يصيغ النتائج التى توصل إليها عند استبعاد الاحتكاك الناتج عن خشونة الأسطح، بذلك أدخل مفهوم النماذج المثالية فى العلم، والتى استخدمها العديد من العلماء فيما بعد فى صياغة القوانين التى تحكم تصادم الكرات فى العلاقات والقوانين التى توصلوا إليها. قبل نيوتن كان المعتقد أن قذيفة المدفع تتحرك فى البداية فى خط مستقيم ثم تكمل مسارها على شكل جزء من دائرة ولكن أثبت جاليليو أن مسار القذيفة هو جزء من قطع مكافىء، كذلك أثبت جاليليو أن أكبر مدى للقذيفة عندما تُطلق بزاوية قدرها ٤٥° مع الأفقى، ثم ذاع صيت جاليليو بعد ذلك للأهمية العلمية لهذه الاكتشافات؛ فقد كان اهتمام العسكريين لا يتركز على النصوص الدينية أو المسارات المثالية وإنما على المسار الفعلى للقذيفة لكى تصيب أبعد هدف.

لقد كان كل هذا تمهيدا لأكبر اكتشاف فى القرن السابع عشر، وهو اكتشاف نيوتن لقانون الجذب العام، وأضاف نيوتن إلى كل هذا فكرة عبقرية وهى التجريد حيث كان يعتبر أن كتلة كل جسم - سواء كان المريخ. القمر أو حتى تفاحة - تتركز فى مركز ثقلها.

لكى يتمكن نيوتن من إجراء الحسابات المطلوبة وضع مبادئ حساب التفاضل والتكامل، ولكنه كان يضطر لترجمة هذه الحسابات للّغة السائدة التقليدية حتى يفهمها معاصروه، وتباطأ نيوتن فى نشر هذه الطريقة فى الحساب بحيث سبقه معاصره الألمانى ليبنتز فى نشر هذه الأفكار، مما خلق لبسا عند مؤرخي العلم: لمن ينسب الفضل فى وضع مبادئ حساب التفاضل والتكامل؟(*)

يمكن تطبيق نفس فكرة التجريد هذه وتجزئة كل جسم إلى عناصر صغيرة، بل

(*) فى نسخة وحيدة لأحد أعمال أرشميدس والتى تمت ترجمتها فى القرن العشرين يظهر سبق أرشميدس بفكرة التكامل مما يجعل المفاضلة بين نيوتن وليبنتز غير ذات معنى.

متناهية الصغر ثم جمع تأثير كل عنصر بإجراء تكامل، يمكن تطبيقها على الزمن أيضا: حيث يمكن رصد مسار سهم على شكل فترات زمنية قصيرة جداً ثم جمع تأثير كل هذه الفترات القصيرة بإجراء تكامل؛ لذا يمكن حساب مسار السهم بدقة عالية وينكشف سر لغز زينو ولا يصبح لغزا. بهذا يمكن أن نجزم بأهمية هذه الخطوة أنها حققت طفرة بالنسبة لقدماء اليونان الذين كانوا بارعين فى تحليل العلاقات بين الأشكال الساكنة فقط. الآن يمكن أن نصل إلى علاقات دقيقة تصف ما يحدث بين الأجسام المتحركة. توصل نيوتن إلى أن الجاذبية تخضع لقانون التربيع العكسى، ولكن هذه الحقيقة كانت معروفة لدى كل من روبرت هوك، أدموند هالى وكريستوفر رن (Rebert Hooke, Edmond Halley, Christopher Wren) وكلهم أعضاء فى المجمع الملكى، لكن كان على نيوتن أن يثبت أن قانون التربيع العكسى هو الوحيد الذى يؤدى إلى مدارات على شكل قطع ناقص، كذلك كان سبق نيوتن أن قانون الجذب العام صحيح ليس فقط بين الأرض والقمر أو الأرض والشمس وإنما لأى جسم مادى وأى جسم آخر: أى أنه قانون كونى صالح لكل زمان ومكان، كما وضع نيوتن قوانين الحركة الثلاثة المسماة باسمه، وبذا شملت دراسته الأجسام المتحركة والساكنة معا.

مع كل هذا النجاح الذى أحرزته قوانين نيوتن فى وصف حركة جسمين، إلا أنها كانت تحوى بذرة الشواش من حيث أنها تعطى إجابات دقيقة إذا كان الجسمان معزولين تماما، ولكن فى الكون لا يمكن فصل الأجسام بعضها عن البعض، وبالتالى حين نبدأ فى دراسة حركة ثلاثة أجسام، لا تعطى هذه القوانين إجابات دقيقة وإنما تحوى نسبة من الخطأ. لابد أن نشير هنا إلى نقطة جوهرية وهى أن هذه الإجابات التى تحوى نسبة من الخطأ ليس معيبة أو ينتج هذا عن قصور منا وإنما هى طبيعة الأمور وتدخل فى صلب البنية الرياضياتية نفسها.

يكمن الحل فى هذه الحالة فى فرض بعض التقريب، كأن نفرض أن أحد الأجسام ساكن فى البداية، ونبدأ فى دراسة حركة الجسمين ثم نضيف تأثير الجسم الثالث ثم الرابع وهكذا..

بالنسبة للمجموعة الشمسية وحيث أن كتلة الشمس تفوق مجموع كتل الكواكب الأخرى فى هذه المجموعة، فإن استخدام التقريب مثلا بالنسبة للمريخ يعطى مدارا قريبا جدا من القطع الناقص إذا أهملنا كتل بقية الكواكب.

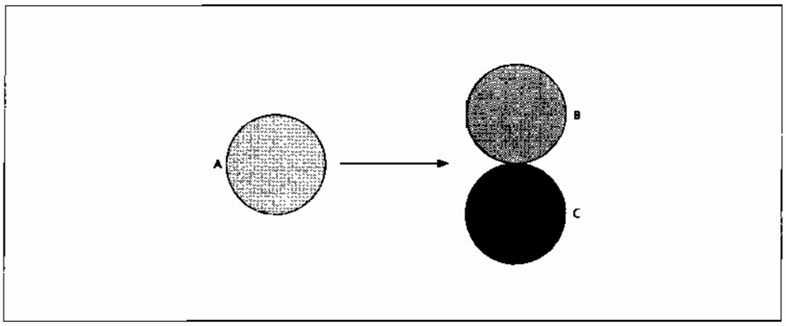
هذا التقريب لا يصلح أيضا إذا ما كانت كتل الأجسام الثلاثة التى ندرسها متقاربة والمسافات متساوية، ففى هذه الحالة يصعب الحصول على حلول تصف مدارات هذه الأجسام بدقة وإلى الأبد.

كان نيوتن واعيا لهذه النقطة، وكرد على ذلك وحيث أنه كان متدينا (رغم اختلاف معتقداته مع تعاليم الكنيسة فى ذلك الوقت) فقد قال إنه عندما تجنح مدارات هذه الكواكب عن طريقها المرسوم فسوف يتدخل الرب ليعيدها إلى مساراتها المرسومة. كان ليبنتز أيضا واعيا لهذه النقطة، وانتقد بشدة ميكانيكا نيوتن قائلا: إن ذلك يعنى أن الرب ليس صانع ساعات ماهر، وعليه التدخل عندما تجنح الساعة وتختل حركتها.

ظل هذا اللغز بلا حل حتى نهاية القرن الثامن عشر عندما بدأ عالم الرياضيات بيير لابلاس (Pierre Laplas) فى حساب مدارات كواكب المشترى وزحل وهى من أثقل الكواكب وخطوة بخطوة وجد لابلاس أن مدار المشترى يتمدد ومدار زحل ينكمش، وبهذا ظن لابلاس أنه قد أعاد الانتظام للمجموعة الشمسية، حتى أنه قال لنابليون: «إن عدم الانتظام فى هذين الكوكبين وإن كان يبدو أنه يناقض قانون الجذب العام ولكن الآن كل هذا يبرهن وبشكل صارخ على صحة هذا القانون».

كما سنرى فإن لابلاس كان محقا ولكن إلى نقطة معينة. بعد ذلك استقر الفكر بين علماء القرنين التاسع عشر والعشرين أن حل نظام المعادلات فى الميكانيكا يصف وبدقة حركة الكواكب والأجسام الأخرى، وعندما تتعقد الأمور فيكفى إيجاد حلول تقريبية تفى بالغرض المطلوب.

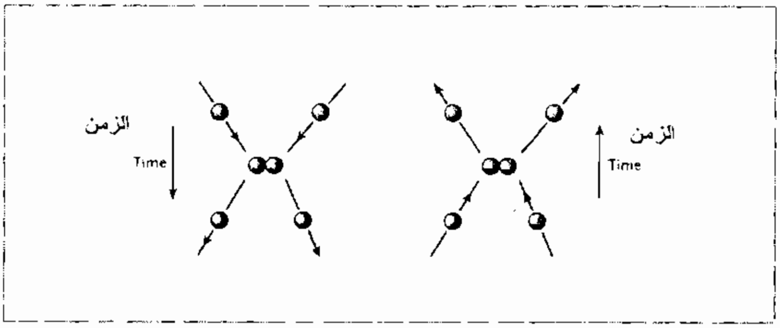
فى مثال آخر أصبح من الواضح أنه فى مسائل التصادم إذا صدمت كرة مرنة أخرى سواء كانت ساكنة أو متحركة فقوانين نيوتن تعطى الإجابة وبدقة كيف ستتحرك الكرتان بعد التصادم، ولكن إذا صدمت كرة كرتين متلامستين، فإن نفس تلك القوانين تعجز عن وصف سلوك الكرات بعد التصادم شكل (١-١).



شكل (١-١)

انشغل العلماء فى القرن التاسع عشر بحل المسائل التى يمكن حلها، وغضوا البصر عن تلك المعقدة، وهذا شىء طبيعى.

ولكن أثار لابلاس فى ١٨١٤م مشكلة أخرى هامة وهى أنه لو وجدت طريقة يمكن بها جمع كل المعلومات الضرورية عن كل الأجسام على اطلاقها فى الكون الذى نعيش فيه، وتم حل كل المعادلات التى تنتج عن ذلك أمكننا أن نحسب الأوضاع الماضية، كذلك والمستقبلية لهذه الأجسام. يعنى هذا أن قوانين نيوتن لا تحوى أفضلية لاتجاه الزمن نحو الماضى أو المستقبل. فعلا كما نرى فى شكل (١-٢) عند تصادم جسمين يمكن عكس كل الأسهم، أى عكس سهم الزمن، ولا يؤثر كل هذا على عملية التصادم ذاتها.



شكل (١-٢): تصادم جسمين وانعكاس اتجاه سهم الزمن ولكن لابد هنا أن نشير إلى مالم يلاحظه أى من العلماء فى القرن التاسع عشر أنه لو حدث تصادم بين ثلاثة أجسام فى أى مكان فى الكون، ينهار هذا المبدأ تماما، ولكن لنترك هذا الموضوع للفلاسفة لكى يتناقشوه.

من ناحية أخرى، من أهم الانتصارات العلمية فى القرن التاسع عشر هو نظرية المجالات الكهرومغناطيسية التى وضعها ماكسويل (١٨٣١ - ١٨٧٩م) والتى ارتكزت على أعمال فاراداى ((١٧٩١ - ١٨٦٧م) الذى أدخل مفهوم المجالين الكهربى والمغناطيسى.

رغم أن فاراداى وضع الصورة الكاملة للمجالين الكهربى والمغناطيسى إلا أنه لم يكن يملك المهارات الرياضية لكى يصيغ الشكل الرياضى لها، ولكن أنجز هذا العمل جيمس كلارك ماكسويل في الستينيات من القرن التاسع عشر، وصاغ نظرية مكونة من أربع معادلات أصبحت بمثابة قوانين نيوتن بالنسبة للميكانيكا - بحل هذه المعادلات الأربع أشار ماكسويل إلى ما يسمى بالموجات الكهرومغناطيسية التى تنتشر وتحمل معها مجالين كهربى ومغناطيسى، كذلك فسرت معادلات ماكسويل كيف تعمل المحركات والمولدات الكهربائية. ثمة جانب أساسى فى معادلات ماكسويل أنها أدت إلى اكتشاف موجات تنتشر بنفس سرعة الضوء (٣×١٠^٨م/ث) والتى كانت معروفة آنذاك، وهذا مما يؤكد الطبيعة الكهرومغناطيسية للضوء. جانب آخر أساسى فى هذه المعادلات وهو أن سرعة الضوء ثابتة بصرف النظر عن حركة

المصدر الذى يُصدر هذا الضوء، وهذه الصفة بالذات قادت أينشتين إلى التوصل إلى النظرية النسبية الخاصة فى عام ١٩٠٥م. دون التوقف كثيرا عند النظرية النسبية الخاصة بالتفصيل، كل الذى يهمنا أن قوانين الحركة فى النسبية الخاصة ضرورية وفقط عندما تتحرك الأجسام بسرعات قريبة من سرعة الضوء هذه، أما بالنسبة لحركة الكواكب فى المجموعة الشمسية فتكفى وبدقة عالية جدا معادلات نيوتن.

لابد هنا أن نشير إلى أن معدلات ماكسويل أيضا لها حد أقصى - عندما نتعامل مع مسافات صغيرة جدا (على مستوى الذرات والجزيئات) فلا ميكانيكا نيوتن ولا معادلات ماكسويل تصلح - لابد أن نستخدم ما يسمى بميكانيكا الكم وهى الميكانيكا التى تصف سلوك الأجسام الصغيرة جدا فى مسافات ضئيلة جدا على المستوى الذرى والجزيئى.

لكن الجانب الأهم فى معادلات ماكسويل هو أنها أيضا مثلها مثل ميكانيكا نيوتن لا تعطى أية أفضلية لاتجاه سهم الزمن ، فمثلا من الغريب أن نرى كرات البلياردو تتجمع مرة أخرى وتقذف بالكرة التى قذفها اللاعب فاصدمت بهم، وتستعيد طاقة الاحتكاك وترقص فى مثلث جميل كما كان الوضع لحظة بدء اللعبة - هذا شيء غريب فعلا بالنسبة لكل هذه المعادلات ألا تفرق بين الحدث ومعكوسة.

من الانجازات الكبيرة فى فيزياء القرن التاسع عشر هو إثارة هذه المسألة المتعلقة بسهم الزمن، لقد أثيرت هذه القضية وبشدة فى الديناميكا الحرارية، فمن الجوانب الأساسية الهامة فى الديناميكا الحرارية أنها تتعامل مع عدد كبير جداً من الجسيمات ويحتاج التعامل معها إلى التعامل مع متوسطات وإحصائيات، ولكن الجانب المثير هو اعتبار أن أى نظام ثرموديناميكى يفترض أن هذا العدد الهائل من الجسيمات يتحرك ويتصادم بعضه مع البعض ومع جدران الآنية التى تحويه حسب قوانين نيوتن للحركة.

إن النظرية الحركية للغازات مثال هام جدا، لكيفية استخراج الانتظام من النظم العشوائية؟ إن كلمة غاز (gas) قد نحتها العالم البلجيكى يوهانز هلمونت من كلمة الشواش (chaos) ، فقد ظلت هذه الصورة سائدة على مدى ثلاثمائة عام، حتى صاغ كل من ماكسويل فى بريطانيا وبولتزمان فى النمسا النظرية الحركية للغازات. أحد أسس هذه النظرية أن ضغط الغاز ينشأ عن تصادمات العدد الهائل من الجزيئات (فى علبة كبريت هناك ألف بليون بليون ٠٠٠ أى العدد ١٠ متبوع بثلاث وعشرين صفرا). فى هذه الحالة لايهم إذا أخذنا صندوقا أكبر أو أصغر عشر مرات. إن جزيء الهواء يتصادم حوالى أربع ملايين مرة فى الثانية الواحدة مما يعطى إحساسا بأن الهواء

هو وسط استمرارى (continuous medium) . مع هذا العدد الهائل واضح أنه لا معنى لمعرفة كل معادلات الحركة لكل الجزيئات، وبالتالى لابد من المعالجة الإحصائية لمثل هذا النظام المكون من عدد هائل من الجسيمات. ولكن كان على علم الحرارة والديناميكا الحرارية أن يعالج بعض الظواهر الحرارية فى عالمنا الحقيقى هذا، وهو أن الحرارة تنتقل من الجسم الساخن إلى الجسم البارد وليس العكس. هنا يكمن شيء كبير: إن سهم الزمن واضح هنا. إذا تركنا ثلجا فى الهواء الجوى فإنه يمتص حرارة من الجو المحيط وينصهر، ولكن لم يحدث أن رأى أحد أن كمية من الماء تترك لنفسها فنجد أنها تجمدت دون أن نمتص منها حرارة بشكل ما هنا واضح جدا سهم الزمن – إنه يسير فى اتجاه واحد. كانت أعمال العالم الفرنسى جوزيف فورييه هى الصيغة النظرية للتعبير عن هذه الحقيقة، وأن مقدار الحرارة الذى ينساب عبر وسط ما يتناسب مع فارق درجات الحرارة . يمثل قانون فورييه هذا حجر الزاوية فى فهم سلوك الحرارة، كما كانت أعمال جاليليو أساس الميكانيكا التى تبلورت بعد ذلك على يد من أتوا بعده.

بعد ذلك لاحظ الكونت رومفورد فى بافاريا فى التسعينيات من القرن الثامن عشر (ولد باسم بنيامين طومسون فى ماساتشوستس والتى كانت مستعمرة بريطانية فى ذلك الوقت، وخلع عليه چورج الثالث ملك بافاريا لقب كونت، وكان رومفورد يعمل كمستشار له) وكان مسئولا عن ثقب مواسير المدافع. لقد لاحظ رومفورد أنه فى نهاية عملية الثقب فإن الماسورة وفتات المعدن المتبقى والمثقاب كلها تسخن وبشدة.

هكذا تبلورت حقيقة أن الآلة البخارية تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى، وثقب مواسير المدافع يحول الشغل الميكانيكى إلى حرارة. هكذا نرى أن الشغل والحرارة وجهان لعملة واحدة. بعد ذلك قام چيمس چول فى بريطانيا فى أربعينيات القرن التاسع عشر بتجارب دقيقة لقياس معامل تحول الشغل الميكانيكى إلى حرارة. قاد كل هذا هلمهولتز فى ألمانيا إلى صياغة قانون بقاء الطاقة وما يسمى بالقانون الأول للديناميكا الحرارية، ويعنى قانون بقاء الطاقة أن الطاقة لا تفنى ولا تخلق من عدم وإنما تتحول من صورة إلى أخرى. كل ذلك يتم فى «نظام مغلق» وهذا نموذج آخر مثالى (مثل السطح الأملس). تبلور بعد ذلك القانون الثانى للديناميكا الحرارية والذى ينص على أنه فى نظام مغلق ستنتهى كل الطاقة الحركية إلى حرارة، وسوف تنتهى كل فروق درجات الحرارة ويصبح النظام بدون أية سمات مميزة، بل وعديم الفائدة.

أصبح لما يسمى الآن بالقانون الثانى للديناميكا الحرارية عدة صيغ بعد أن صاغه لأول مرة اللورد كلفين (Kelvin) (وليام طومسون) (William Thomson) فى عام ١٨٥٢م.

كانت الفكرة المحورية فى صياغة طومسون أن الكون هو عبارة عن آلة ضخمة تحول الحرارة إلى شغل ميكانيكى ولكن أثناء هذه العملية يُفقد جزء من هذه الحرارة، فى الواقع هى لا تفقد ولكن تتناثر وتنتشر فى الفراغ الكونى وترفع درجة حرارته بمقدار ضئيل. لا يتعارض هذا مع القانون الأول للديناميكا الحرارية نظرا لأن مقدار الطاقة ككل ثابت، ولكن مقدار الطاقة «المفيدة» يتناقص. بهذا أصبح على الفيزيائيين أن يدرسوا هذه الطاقة المفيدة ويُخضعوها لمعادلات رياضية تسمح بإجراء الحسابات اللازمة للاستفادة القصوى منها. دفع كل ذلك العالم الألمانى رودولف كلاوزيوس (Rudolph Clausius) لكى يُدخل مفهوم «الأنتروبية» فى منتصف الستينيات من القرن التاسع عشر.

لنأخذ مثالا على ذلك: صندوق نصفه ملىء بغاز والنصف الآخر فارغ، وبين النصفين حاجز (شكل (١-٣)). إذا رفعنا هذا الحاجز فسوف يشغل الغاز الحيز بالكامل وتنخفض درجة حرارة الغاز قليلا نظرا للتمدد، وإذا أردنا إعادة الغاز إلى نصف الصندوق مرة أخرى، لابد من بذل شغل، وفى النهاية هناك طاقة مفيدة قد فقدت. مثال آخر: إذا أخذنا لوحة شطرنج يكون بها مربعات سوداء وأخرى بيضاء، لنتصور أننا استطعنا خلط كل جزيئات هذا الطلاء فسوف نحصل على لوحة مطلية بلون رمادى، إذا أردنا بشكل ما إعادة اللوحة إلى شكلها الأول، فلابد أن نبذل شغلا حتى نعيد الطلاء إلى المربعات التى كانت سوداء.



(أ) نصف الصندوق ملىء بغاز والنصف الآخر مفرغ

(ب) بعد رفع الحاجز ينتشر الغاز ويملأ الصندوق كله

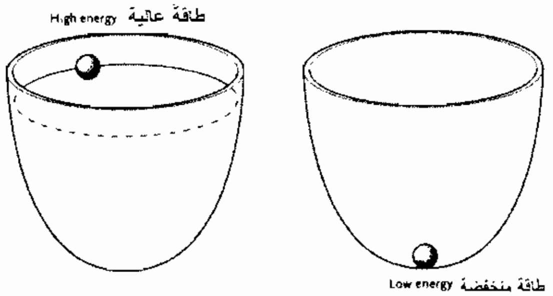
شكل (١-٣)

يعنى كل هذا أن سهم الزمن واضح فى هذه المسائل - كل نظام مغلق يميل نحو الفوضى. إذا طبقنا هذه الرؤية على الكون كنظام ثرموديناميكى نجد أنه فى النهاية لابد أن تتساوى درجات الحرارة فى الكون وبالتالى تنتهى الطاقة المفيدة ويحدث ما يسمى بالموت الحرارى للكون. ساد هذا الاعتقاد بين علماء النصف الثانى من القرن التاسع عشر، ولكن فى بداية القرن العشرين اكتشف العلماء الفلكيون أن الكون يتمدد وبذا أصبحت هذه القضية أكثر تعقيدا مما كان يُتصور.

من كل ما سبق نرى أنه فى الحياة على المستوى الماكروسكوبى يسير كل شيء من الانتظام إلى الفوضى، ولكن على المستوى الميكروسكوبى إذا عكسنا سهم الزمن فلابد أن يعود كل شيء كما كان: أى يكون اتجاه سهم الزمن من الفوضى إلى الانتظام. كان من الواضح أن هناك معضلة ولابد لها من حل.

كَمُن الحل فى إدخال مفهوم الجاذب "attractor" فبالنسبة للصندوق الذى يحوى نصفه غازا ونصفه الآخر فارغ، إذا حدثت فتحه فى الحاجز فإن الغاز ينتشر فى النصف الفارغ ويتوزع متجانسا فى كل الحيز ويصل إلى حالة اتزان. هذه الحالة تتميز بشيئين: إنها حالة استقرار (أى الحد الأدنى للطاقة) والآخر هو أن هذه الحالة لا تعنى بالكيفية التى وصل بها الغاز إلى هذا الحالة (أى أنها لا تحمل أى بصمات عن الماضى أو عن تاريخ الأحداث التى أوصلت الغاز إلى هذه الحالة المستقرة).

فى حالات أخرى أبسط وضعنا كرة ملاصقة للجدار الداخلى لإناء، كما فى شكل (١-٤)، نجد أن الكرة بعد بعض التذبذبات تستقر فى القاع - تمثل نقطة القاع «الجاذب» فى هذه الحالة.



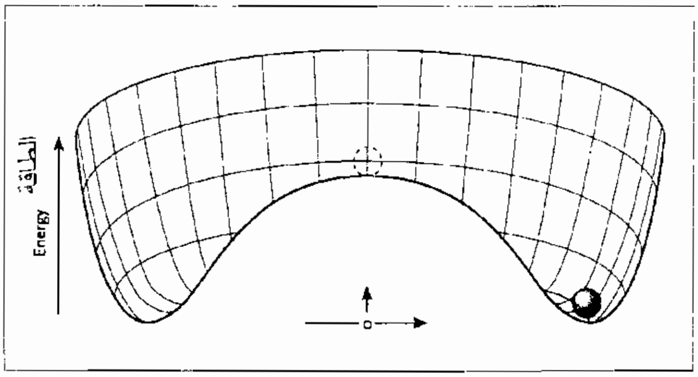
شكل ١-٤

ليست الأمور بهذه البساطة - إذا وضعنا كرة فى قبعة مكسيكية فإنها تستقر عند أى نقطة فى القاع ويسمى الجاذب فى هذه الحالة «جاذب القبعة المكسيكية» كما فى شكل (١-٤) حيث يمثل الجاذب دائرة كاملة.

بالنسبة للبندول البسيط المثالى فإنه يظل يتذبذب دون توقف، وهذه هى الحالة «الجاذبة» لهذا النظام. أما بالنسبة للبندول الحقيقى فإنه سوف يتوقف بعد عدد من التذبذبات فى وضع رأسى، وهذه هى «الحالة الجاذبة» بالنسبة للبندول الحقيقى - من المهم هنا أن هذه الحالة لا تحمل أية معلومات عن كيف وصل النظام إليها - أى أن ليس لها «ذاكرة»، ويقال إن النظام ينسى الشروط الابتدائية له - أى من أين

بدأ حتى وصل إلى حالته النهائية هذه. كل ما يهمنا هو: أين بدأ حتى وصل إلى حالته النهائية هذه؟ كل ما يهمنا هو: أين يوجد النظام الآن؟

السؤال الآن هو: ومتى يصل النظام إلى حالة الاستقرار؟



شكل (١ - ٥): إن الحالة التى يستقر عندها النظام تسمى «بالجاذب» فى الحالة المبيَّنة سوف تستقر الكرة فى قاع «الوادى» وهى منطقة ممتدة وليست نقطة.

لنستعر مثالا أورده إليا بريجوجين Ilya Brigogine وإيزابيل ستينجر Izabelle Stengers

إذا أوصلنا أسطوانتين تحويان خليطا من غازى الأيدروجين وكبريتيد الأيدروجين فإنه عند حالة الاستقرار يكون الخليط متجانسا. أما إذا كانت درجة حرارة إحدى الأسطوانتين أعلى ولو بقدر ضئيل، يبدأ الخليط فى الانفصال وتأخذ نسبة الأيدروجين فى الازدياد فى الاسطوانة الأدفأ. هكذا نرى أن حالة الاستقرار تزول ويبدأ ظهور انتظام فى حالة الشواش. وهكذا إذا بعدنا قليلا عن حالة الاستقرار، نلاحظ أن الطاقة تنساب من مكان لآخر - أى يظهر انتظام . الخلاصة أن النظام عند استقراره تكون الأنتروبية أعلى ما يمكن، ولكن معدل إنتاج الأنتروبية يقل عندما يبعد النظام عن وضع الاستقرار. لم يتبلور هذا المفهوم إلا فى بداية القرن العشرين. أدى ذلك إلى ظهور الديناميكا الحرارية كعلم إحصائى، وامتدت إلى ما يسمى «بالميكانيكا الإحصائية» وهكذا تبلورت أيضا التفرقة بين كون النظام فى حالة استقرار وكونه قريبا من الاستقرار، والفارق بين الحالتين كبير جدا.

الجزء الأكبر من هذه الأعمال يرتبط بمحاولة وصف سلوك الغازات بواسطة علاقات ومعادلات رياضية فيما يسمى بالنظرية الحركية للغازات. لقد أدخل كلاوزيوس مفهوم «المسار الحر المتوسط» فى ١٨٥٨م، وهو المسافة المتوسطة التى يقطعها الجزىء بين كل تصادمين متتاليين، كذلك أدخل كلاوزيوس مفهوم القطر الاعتبارى للجزىء، وبنى ماكسويل على هذه المفاهيم وتوصل إلى ما يسمى «توزيع

ماكسويل للسرعات». أضاف لودفيج بولتزمان إلى كل أعمال ماسكويل ووضع أسس الميكانيكا الإحصائية. على الجانب الآخر من الأطلنطى وفى الولايات المتحدة قام جوشوا ويلارد جيبس (Josua Willard Gibbs) بصياغة قوانين الميكانيكا الإحصائية فى قالب رياضى أنيق.

دون الدخول فى تفاصيل «الميكانيكا الإحصائية» سوف نحاول تفسير اللغز السابق، وهو أن كل حركات الجزيئات وتصادماتها تخضع لقوانين نيوتن، أى أنها انعكاسية، ولكن إذا وضعنا جزيئات غاز فى نصف صندوق ثم أزحنا الحاجز فإنه ينتشر فى الصندوق كله ولم ير أحد حتى الآن أن الغاز يمكن أن يتجمع وحده مرة أخرى فى نصف الصندوق دون تدخل خارجى.

لنرى كيف عالجت «الميكانيكا الاحصائية» هذه المشكلة، إذا بدأنا بجزيئين اثنين فالحالات المختلفة التى تتواجد بها الجزيئات فى نصفى الصندوق هى أربع حالات: الجزىء أ فى النصف الأيمن والجزىء ب فى النصف الأيسر والعكس، أو يتواجد الجزيئان إما فى النصف الأيمن أو فى النصف الأيسر. وهكذا مع الوقت يمكن أن نشاهد أن أيًا من الأوضاع الأربعة يتحقق فيه ربع وقت الملاحظة. إذا كان هناك أربع جزيئات، فسوف نلاحظ أنه فى معظم الوقت يكون هناك جزيئان فى كل نصف من الصندوق. من النادر تماما أن ترى تجمع الجزيئات الأربعة فى أى من النصفين. إذا أخذنا ثمانية جزيئات فسوف يكون الوضع الذى تتوزع فيه الجزيئات أربعا فى النصف الأيمن وأربعا فى النصف الأيسر سبعين حالة مقابل حالة واحدة عندما تتجمع الجزيئات فى أحد النصفين.. وهكذا نرى أن تجمع الجزيئات فى أحد النصفين احتمال ضئيل وإن كان لا يساوى الصفر. مع ازدياد عدد الجزيئات تقل احتمالية هذا التجمع بشكل كبير جدا. توصل بولتزمان (Boltzmann) إلى علاقة تربط الأنتروبية بالاحتمالية(*) وكان فخورا جدا بهذه العلاقة.

السؤال الآن: كم من الجزيئات فى صندوق صغير من الغاز؟ تأتى جذور هذه المشكلة منذ صاغ العالم الإيطالى أماديو أفوجادرو فى ١٨١٤م مبدأه الذى ينص على أن الحجوم المتساوية من الغازات عند معدل الضغط ودرجة الحرارة تحوى عددا متساويا من الجزيئات.

رغم المحاولات العديدة التى تمت لتحديد عدد الجزيئات فى حجم معين سوف نذكر عمل لوشميدث فى الستينيات من القرن التاسع عشر حيث استطاع بمهارة أن يحدد أنه فى السنتميتر المكعب الواحد يوجد $٢,٦٨٤ \times ١٠^{١٩}$ جزىء. لكى نعطى

(*) هذه العلاقة هى $S = K. \log p$ حيث S- الأنتروبية، P- الاحتمالية، k- يسمى ثابت بولتزمان وقد نقشت هذه العلاقة على قبر بولتزمان .

فكرة عن كبر هذا الرقم، لنأخذ فى الاعتبار أنه فى مجرة درب التبانة حوالى ٣٠٠ بليون أى ٣٠٠ × ١٠^٩ نجم، وإذا ضربنا هذا الرقم فى نفسه نحصل على ٩٠٠ × ١٠^١٩ نجم فى الكون كله من هذا نجد أن ٤٥٠ سنتيمتر مكعب تحوى عددا من الجزيئات تساوى تقريبا عدد النجوم فى الكون كله. مع هذا العدد الضخم من الجزيئات توصل بولتزمان أنه فعلا يستقر الغاز فى حالة تساوى درجات حرارة جزيئاته – أى أن علاقات بولتزمان تتحدث عن قيم متوسطة لضغط ودرجة حرارة جزيئات الغاز – وليس عن ما يحدث بالتفصيل مع الجزيئات نفسها.

ولكن يظل سؤال هام: لماذا نعيش نحن الآن فى كون منتظم؟ ذهب بولتزمان أبعد من أى شخص آخر وقال: إن الموت الحرارى للكون قد حدث فعلا، ونحيا نحن الآن فى حالة استقرار. ولكن ثمة سؤال آخر: لماذا نحيا نحن فى عالم منتظم؟ كيف تكون الحياة على الأرض بعيدة هكذا عن الاستقرار؟ أجاب بولتزمان: إن الحياة على الأرض هى مجرد «اضطراب fluctuation» عالى الشدة قصير العمر،ولخص بولتزمان رؤيته أننا أمام وضع من اثنين إما أن نفرض أن الكون ككل فى حالة من حالات الاحتمالات الضئيلة أو غير المحتملة بالمرة؛ نظرا لأن المسافة بيننا وبين أقرب نجم سيريوس (Sirius) هى لحظة قصيرة جدا فى عمر كون بهذا الحجم الهائل. فى هذه الحالة سوف توجد أجزاء من الكون حيث تزداد الأنتروبية وفى أجزاء أخرى سوف تقل، وكلا الاتجاهين لا يمكن التفريق بينها فهما متكافئان، مثلما يستحيل تحديد «إلى أعلى» و«إلى أسفل» فى مثل هذا الكون. مثل هذه الفرضية مقبولة إذ إنها تفسر لماذا يكون اتجاه الزمن من عالم أكثر انتظاما إلى عالم أقل انتظاما، وهذا يحدد الماضى والمستقبل، ويدعم كذلك القانون الثانى للدنياميكا الحرارية، والموت الحرارى لكل عالم منفصل معزول دون التأثير على كون الكون ينتقل من حالة ابتدائية إلى حالة أخرى نهائية.

رغم أن بولتزمان قد اختار الجاذبية للتعرف على الاتجاه إلى أعلى أو إلى أسفل، فإن الجاذبية هى نفسها التى تقوض فكرة أن الكون يتجه من حالة ابتدائية إلى حالة نهائية، حيث أن فكرة بولتزمان تدعم الاعتقاد السائد بنظرية الانفجار الكبير، ولكن الآن يؤمن الكثير من الفلكيين أن الجزء المرئى من الكون هو جزء صغير جدا من الكون الكبير، بل اللانهائى، وأن عالمنا هو واحد من فقاعات كثيرة جدا تتحدد فى كون متجانس إلى حد ما.

لكن هناك عيب واضح ليس فى رؤية بولتزمان الفلسفية ولكن فى الرياضيات التى استخدمها، لقد بدأ بولتزمان بفرضية أن الجزيئين المتصادمين فى الغاز لا يعرف أحدهما الآخر قبل التصادم، وبالتالى فحركتهما غير مرتبطة – أحدهما بالآخر – ولكن بعد التصادم فالحركة مرتبطة حسب قوانين نيوتن، وهكذا يظهر سهم الزمن فى

هذه الحسابات، ولكن ليس من المنطقى أن نفترض أن هذا الارتباط يعمل فى اتجاه ما ولا يعمل فى الاتجاه المعاكس. وضع لابلاس هذا النقد بصورة أن هذه الحسابات تؤدى إلى أن أوضاع وسرعات كل جزىء تمتلك ذاكرة عن كل الأحداث الماضية للغاز، أى أن كل تصادم لكل جزىء مرتبط بسلوك كل جزىء من جزيئات الغاز.

هنا ظهر هنرى بوانكاريه (١٨٥٤ - ١٩١٢م) ليثبت بشكل رياضى صارم أنه بالنسبة لصندوق يحوى عددا محدودا من الجزيئات (مهما كان كبيرا ولكن ليس نهائيا) ويخضع لقوانين نيوتن للحركة، فإنه سوف يمر بحالات متكررة، بحيث يتكرر وضع وسرعة كل جزء مساويا للحالة التى بدأ بها الغاز. يمكن أن نسوق مثالا مناسبا ففى ورق اللعب (الكوتشينة) عندما نبدأ بترتيب معين للأوراق ونبدأ فى خلطها بشكل عشوائى فسوف يمر وقت معين حتى تأخذ الأوراق نفس الترتيب بالضبط الذى بدأنا به. يسمى الزمن اللازم لذلك «بالزمن الدورى لبوانكارية». هنا يمكن القول بأن الأنتروبية وإن زادت فسوف يمر وقت معين تعود بعده إلى قيمتها الأولى، وهذا ناتج عن تطبيق قوانين الحركة لنيوتن والتى لا تفرق بين الماضى والمستقبل، كلاهما له نفس الاحتمالية.

لكن هنا جانب هام وهو أن الفترات الزمنية التى نتحدث عنها كبيرة بدرجة يستحيل استيعابها، إن عمر الكون هو $١٠^{١٧}$ ثانية، من ناحية أخرى يحوى السنتيمتر المكعب $١٠^{١٩}$ جزىء وهكذا يمكن تصور احتمالية أن الغاز يمكنه أن يتواجد فى حالة بعيدة عن حالة الاستقرار، إنها بالقطع احتمالية متناهية الضآلة. إذا كان الصندوق يحوى اثنين وخمسين جزيئا (أى عدد الأوراق فى كومة ورق اللعب) يكون زمن الدورة $١٠^{٥٢}$ ثانية أى $١٠^{٣٥}$ مرة عمر الكون. لكى يساوى زمن الدورة عمر الكون لابد أن يحوى الصندوق سبعة عشر جزيئا فقط.

فى النهاية يمكن أن نستنتج أن الديناميكا الحرارية تسمح بزيادة الأنتروبية كما تسمح بنقصانها، ولكن هذه الحقيقة لم تكن مريحة لكل علماء الفيزياء. بعد قرنين من الزمن منذ أعمال نيوتن، وبعد ٧٥ سنة من أعمال لابلاس يجد العلماء أن العالم ليس عالما محددا وإنما عالم احتماليات، ولكن استقر هذا الوضع، وولدت أجيال من الفيزيائيين ونشأت وكبرت ونشأت على هذه الحقيقة وتقبلتها كواقع، لكن بوانكاريه انتقل إلى مشكلات أخرى، فى أواخر الثمانينيات من القرن التاسع عشر: تبين أن نيوتن كان محقا فى قلقه على استقرار مدارات الكواكب وأن لابلاس لم يكن محقا فى قناعته أنه قد توصل إلى حل اللغز ، وتوصل بوانكاريه إلى أنه لا يمكن حل مسألة الأجسام الثلاثة ولا حتى تقريبيا، وأن المدارات البسيطة التى تخضع لقوانين الحركة لنيوتن وقانون الجاذبية يمكن أن تسلك سلوكا شواشيا وغير ممكن التنبؤ بما يحدث لها بكل معنى الكلمة.

الباب الثانى

عودة الشواش

بدءاً ذى بدء لابد أن نقر حقيقة أن الحلول التقريبية بطريقة التكرارية لاتعطى دائما حلولا جيدة، وبالأخص لمشكلة حركة ثلاثة أجسام.

الرياضياتيون معتادون على استخدام المتسلسلات التى تضيف أرقاما إلى أرقام إلى أرقام، ولكن لابد أن يكون سلوك هذه الأرقام منضبطا، أى أنها تؤول إلى كمية منتهية، فمثلا بالنسبة للرقم π (ط) وهى النسبة بين محيط وقطر الدائرة يمكن الحصول على قيمة «ط» بأى دقة محددة مسبقا.

فمثلاً بالنسبة للرقم π نحصل على

$$4\ (1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + \ldots\ldots)$$

فى أول تقريب نحصل على الرقم 4 ، وهذا بعيد عن الرقم 3.14 ، فى التقريب الثانى نحصل على 2.6666 وهى أفضل قليلا وأقل من القيمة الحقيقية، وفى التقريب الثالث نحصل على 3.46666 ، وهكذا مع كل تقريب نقترب من القيمة الفعلية، ولكنها عملية مجهدة بجمع ملايين الأرقام لنحصل على القيمة 3.1415937 .

ولكن ليس كل هذه المتسلسلات تتقارب وتؤول إلى قيمة معينة، فمثلا بجمع الأرقام :

$$1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \ldots\ldots\ldots$$

لا تتقارب وبالتالى لا تعطى قيمة محددة وإنما تؤول إلى مالانهاية.

أيضا ومن المدهش أن المتسلسلة

$$1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \ldots\ldots$$

أيضا لا تتقارب وتؤول إلى مالا نهاية.

أيضا المتسلسلة

$$1 - 2 + 3 - 4 + 5$$

تتذبذب ولا تنتهى إلى قيمة واحدة بل تعطى القيم ..... 2.3 - 1.2 - 1,

كذلك يمكن النظر إلى المتسلسلة العامة التالية:

$$x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \ldots\ldots$$

هذه المتسلسلات معروفة منذ نيوتن وقد استخدمها لحل المسائل، والتى قادته لوضع أسس التفاضل والتكامل.

أهم جانب فى هذا الموضوع أنه يستحيل مسبقا التنبؤ بأن المتسلسلة سوف تتقارب أم لا، الأصعب من ذلك أنه أيضا يستحيل التنبؤ بأن الخطوة التالية يمكن أن تعطى إجابة غريبة وبعيدة جدا عما هو متوقع. واجهت هذه المشكلة كل علماء الفلك الذين كانوا يحاولون حساب المدارات التى تدور فيها الكواكب فى المجموعة الشمسية وذلك فى منتصف القرن التاسع عشر، لم يقلق كل ذلك الفلكيين ولكنه أقلق علماء الرياضيات، وحيث إن المجموعة الشمسية مستقرة كانوا يودون إثبات ذلك.

فى عام ١٨٥٨م أخبر العالم الألمانى ديريخليه (Dirichlet) تلميذه كرونكر (Kronecker) أنه توصل إلى طريقة لحل نظام من المعادلات التفاضلية الخاصة بحساب أفلاك المجموعة الشمسية، أن المتسلسلات المستخدمة متقاربة، ولكن للأسف تُوفى فى العام التالى قبل أن يفضح عن تفاصيل هذا العمل.

فى الثمانينيات من القرن التاسع عشر أُعلن فى ستوكهولم بالسويد عن جائزة مالية لمن يقدم حلا لأى من أربع معضلات رياضية، كانت إحداها معضلة ديرخليه والتى تلخصت فى إثبات أن المجموعة الشمسية مستقرة . تقدم هنرى بوانكاريه بالحل ووضع طريقة مازالت تستخدم حتى الآن فى دراسة النظم الديناميكية. لقد أدخل عالم الرياضيات الأيرلندى وليام هاملتون (William Hamilton) (١٨٠٦ – ١٨٦٥م) مفهوم الفراغ الطورى (Phase space) ، استخدم هاملتون مفهومى الوضع وكمية الحركة لدراسة تفاعلات الأجسام.

إن معنى الفراغ الطُورى قريب من لوحات الإعلان فى البورصة وغيرها. بالنسبة لدراسة الميكانيكا وحركة الأجسام بدلا من التعبير عن موضع جسم متحرك بفراغ ثلاثى الأبعاد ثم بفراغ آخر يبين السرعة فى الاتجاهات الثلاث (z, y, x) يمكن استخدام فراغ تخيلى سداسى الأبعاد بحيث تعطى كل نقطة موضع وسرعة الجسم معا. أما إذا تعاملنا مع جسمين فيلزم لهذا فراغ من اثنى عشر بعدا. إذا أردنا وصف سلوك جزيئات غاز فى صندوق سوف نحتاج إلى عدد من الأبعاد ست أضعاف عدد الجزيئات، وهو رقم كبير جدا كما رأينا.

يمكن النظر إلى الفراغ الطورى على أنه قطعة على سطح الأرض تحوى وديانا حفرا عميقة وتلالاوجبالا. إن مؤثر هاميلتون (الهاميلتونيان) (Hamiltonian) يمكن الرياضياتيين من متابعة النظام وسلوكه مع مرور الوقت دون اللجوء إلى حل كل المعادلات كل على حدة. إذا تصورنا أننا سكبنا ماءً فى هذا الفراغ الطورى فسوف ينساب الماء فى الوديان ويتجمع فى الحفر العميقة، وينساب بسرعة من رءوس الجبال والتلال. كذلك يبين الهاميلتونيان كيف ينجذب النظام نحو الوديان والحفر العميقة. من المهم هنا أنه فى هذا الفراغ الطورى يدل سلوك جسيم واحد على سلوك كل الجسيمات، فمثلا جزىء الماء فى نهر سوف يظل بين شاطئ النهر ومن غير المعقول أنه سوف يتسلق جبلا فى طريقه.

إذا عدنا إلى مثال بسيط وهو البندول الخيطى وأخذنا المحور الأفقى ليمثل الموضع والمحور الرأسى ليمثل السرعة، نجد أن المسار هو قطع ناقص، أما إذا أدخلنا الاحتكاك فسوف تقل السرعة وتقل الإزاحة، وهكذا نحصل على مسار حلزونى لينتهى عند نقطة الأصل، وهى «الجاذب» فى هذه الحالة لمثل هذا النظام المعين.

إن النظر إلى الفراغ الطورى على صورة وديان وجبال هو صور مبسطة من فرع الرياضيات المسمى بالتوبولوجيا (Topology) - والذى كان بوانكاريه رائده والذى حاول استخدامه لإثبات استقرار المجموعة الشمسية، لقد حول المسألة من مسألة ميكانيكية وديناميكية إلى مسألة هندسية .

جانب أساسى فى هذه المعالجة أنه إذا مرت النقطة فى الفراغ الطورى بنفس المكان مرة أخرى، يعنى ذلك أن النظام سوف يعود لوضع البداية ويتكرر ذلك دائما مما يعنى أن النظام مستقر، وهكذا إذا مرت النقطة قريبا من الموضع السابق الذى مرت به فليس من المحتمل أية أمور غير متوقعة، أى أن النظام مستقر إلى حد كبير. بالنسبة لثلاثة أجسام يعنى ذلك أن الأجسام الثلاثة لن تتطاير بعيدا عن بعضها البعض ولن تتصادم، ولكن نؤكد مرة أخرى .. من يدرى؟

ما قدمه بوانكاريه للمسابقة لم يكن حلا توبولوجيا للنظام الشمسى ولكن كان تركيزه على العرض الهندسى لمسارات فى الفراغ الطورى لجسمين متجاذبين، وهذه مسألة معروفة يمثّل مسارها بمنحنى مغلق فى الفراغ الطورى، مما يعنى استقرارها ولكن بإضافة جسم ثالث فى «نظام ثلاثى محدود» أى عندما يكون الجسم الثالث صغيرا يتأثر بجاذبية الجسمين الأولين ولا يؤثر فيهما، ولذا يسمى «بالجسم الغبارى». حتى فى هذه الحالة لا يمكن حل المعادلات الرياضية المعالجة لمثل هذه الحالة

بشكل تحليلى (Analytical) ، لأنه حتى الجسم الغبارى لابد أن يكون له تأثير جاذبى على الجسمين الآخرين.

هنا أدخل بوانكاريه فرضية مبسطة، وهى أن ننظر إلى مقطع عرضى فى الفراغ الطورى والمعروف الآن باسم «مقطع بوانكاريه» وننظر فقط إلى قطعة صغيرة من هذا الفراغ الطورى حيث يظهر المسار الذى سوف يتبعه النظام.

والآن لا يهمنا - مهما كان معقدا تقاطع المسار - ماذا كان النظام يعود إلى نقاط سبق أن مر بها، فى هذه الحالة يكون المسار دوريا، وهذا هو أهم استنتاج. كان على بوانكاريه أن يحل المسألة بشكل تقليدى حتى يوضح أفكاره ثم ينتقل إلى الأمور الجديدة التى توصل إليها، وهى أنه ليس كل المتسلسلات متقاربة وإنما بعضها فقط يمكن أن يكون متقاربا. لقد احتاج كل هذا إلى حوالى مائتى صفحة، وكان معظمه جديدا جدا على المحكمين للجائزة، وتسلّم بوانكاريه الجائزة فى ٢١ يناير ١٨٨٩م.

من الطريف أنه عندما نشر بوانكاريه هذه الأعمال وأخذ الرياضيايتون وقتا كافيا لدراستها وجدوا خطأ فى برهان بوانكاريه، وانكب هو لإصلاح هذا الخطأ، ومن الطريف أيضا أنه وجد أن الحلول من ناحية المبدأ غير مستقرة، وإنما الحلول المستقرة هى التى تعتبر شاذة، وجد بوانكاريه أيضا أن بعض المسارات تمر بنقاط غير التى مرت بها ولكنها دورية ولكن لا تعود لنفس النقاط السابقة.

كان من الأنباء السعيدة أن حلول بوانكاريه تعطى حلولا مستقرة لحركة ثلاثة أجسام حتى وإن لم تكن مساراتها دورية تماما، ولكن لمدد طويلة جدا بمقياس الزمن البشرى، أو مقارنة بعمر الشمس نفسها.

جانب أساسى آخر: أن بوانكاريه توصل إلى أنه فى بعض الظروف (ليس كل الظروف، ولكن فى نفس الوقت فى ظروف ليست نادرة) أن بعض النظم التى تبدأ من نفس الظروف الابتدائية يمكن أن تتطور وبسرعة كبيرة فى اتجاهات متباينة، ورغم أن بوانكارية لم يصغ هذه الأمور بهذا الشكل ولكنه فى الواقع وضع أساسيات الشواش.

يمكن أن نتحسس ذلك بطريقتين: الأولى تعود بنا إلى التناظر بين الفراغ الطورى وقطعة الأرض التى ينساب الماء عبرها، إن مسار جسيم واحد يعبر عن مسار النظام بأكمله، سواء كان بسيطا مثل حركة ثلاثة أجسام محدودة أو الكون بأكمله. لنتصور نهرا ينساب ثم يتفرع إلى عدة فروع ويكون دلتا مثل نهر الجانج، إذا انساب جزىء من الماء دخل فرعا من الفروع فيمكن لجزىء آخر أن يذهب إلى فرع آخر

وبالتالى نجد أن الجزيئين انتهيا إلى حالتين مختلفتين تماما. فى مثال آخر لنتصور أن قطرة ماء تسقط على حرف حاد من جبل لتنساب عبر مجرى إلى المحيط والذى يمثل «جاذبا» لهذا النظام - أما قطرة أخرى يمكن أن تسقط فى جانب آخر من الجبل وتنساب إلى محيط آخر ويمثل أيضا «جاذبا» لهذا النظام، ورغم تباعد الحالتين النهائيتين للقطرتين، لكنهما بدأتا من وضعين متقاربين تماما.

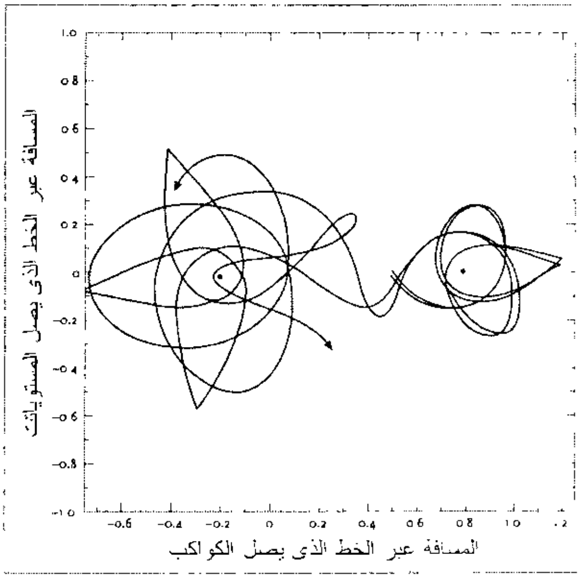
مثال آخر من الحياة - لقد تعودنا على العلاقات الخطية، فمثلا، إذا كانت خطوة شخص هى متر واحد، عندئذ إذا خطا هذا الشخص خطوة واحدة يقطع مترا، خطوتين مترين، وهكذا عشر خطوات تناظر عشرة أمتار. ولكن لنفرض أن جسما يتحرك بحيث يقطع فى كل خطوة ضعف الخطوة السابقة، فهذا يعنى أنه فى الخطوة الثانية يقطع مترين، فى الثالثة أربعة أمتار، وفى الخطوة الحادية عشرة يقطع ١٠٢٤ مترا، أى تزيد بمتر عن كل المسافات المقطوعة فى العشر خطوات السابقة، وهكذا نرى أن الأشياء غير الخطية تتغير بسرعة كبيرة جدا. لقد لاحظ بوانكارية أن بعض النظم حساسة جدا للتغيرات الطفيفة فى الحالات الابتدائية لها، تكمن الفكرة هنا أنه فى النظم الخطية يكون النظام مساويا لمجموع الأجزاء المكونة له، ولكن فى النظم اللاخطية يكون النظام إما أكبر بكثير أو أقل بكثير من مجموع أجزائه.

المشكلة هنا أنه فى النظم اللاخطية يصعب التنبؤ بسلوكها، فأى خطأ بسيط فى تقدير الحالة الابتدائية يؤدى إلى خطأ كبير جدا فى الحالة النهائية. فى عمله المنشور فى عام ١٩٠٨م المسمى «بالعلم والطرق العلمية» أشار بوانكاريه إلى مشكلة الأجسام الثلاثة المحددة كما هو مبين فى شكل ٢-١. فى نفس العمل أشار إلى صعوبة التنبؤ بالطقس وكيف أنه يلزم الناس أن تصلى لجلب المطر أو حتى الطقس الجيد ولكنهم لا يصلون من أجل كسوف مثلا؟،كل هذا ناتج عن أن خطأ طفيفا فى تقدير درجة (الرياح العاتية) السيكلون يترك الفرصة للأماكن المحظوظة التى تسلم من تدميره والأخرى غير المحظوظة التى يدمرها. كل هذا نتيجة اختلاف فى جزء من الدرجة، التى لو عرفها مسئولو الطقس لتمكنوا من إصدار تنبؤات أفضل للطقس.

لقد سبق بوانكاريه عصره بكثير، كذلك كان عالم الطقس الإنجليزى لويس فرى رتشاردسون فى العشرينيات من القرن العشرين ولكن كانت تنقصه أدوات الإنجاز فى ذلك الوقت وهى الآلات الحاسبة السريعة.

ولد رتشاردسون فى عام ١٨٨١م وتوفى فى عام ١٩٥٣م وعمل مديرا لمحطة أرصاد فى سكوتلندا إبان الحرب العالمية الأولى. كان يعمل أثناء الحرب سائقا لسيارة إسعاف، وفى وقت فراغه كان يحاول أن يحسب تغيرات الطقس لمدة ٦ ساعات إذا

علم ظروف الطقس فى ساعة ما. كان العمل شاقا ومضنيا ولكن الجانب المهم أنه حاول أن يثبت أن الحسابات الرياضية التقريبية مع قوانين الفيزياء يمكن أن تؤدى إلى تنبؤ بالطقس. لقد سبقه بحقبة فى هذا المجال النرويجى ويلهلم بيركنز (Wilhelm Bierkens) . لقد آمن بيركنز أن المعادلات الرياضية المتاحة كافية لاجراء تنبؤات الطقس إذا عرفنا الحالات الابتدائية بدقة كافية.



شكل (٢-١) بالنسبة لمشكلة ثلاثة أجسام – إذا كان قمر صناعى صغير يدور حول كوكبين كبيرين، يؤدى تغير ضئيل فى مسار القمر إلى تغير كبير جدا فى مداره، وحيث أننا لا نستطيع أن نعرف الشروط الابتدائية بدقة، يعنى هذا أننا لا نستطيع التنبؤ بمداره. نبين فى الرسم مسار القمر مع ثبات وضع الكوكبين الكبيرين.

تنبنى فكرة التنبؤ بالطقس حسب هذه الطريقة التى مازالت هى عماد طرق التنبؤ الحالية، فى قياس الخواص الهامة للهواء الجوى مثل درجة الحرارة والضغط عند نقاط شبكية على سطح الأرض وإلى أعلى فى الغلاف الجوى. كلما كانت هذه النقاط متقاربة كلما كان النموذج الرياضى أكثر دقة. بعد ذلك نطبق قوانين الفيزياء لكى نحسب كيف ستتغير هذه الخواص عند كل نقطة تحت تأثير النقاط المجاورة (حيث تنساب الحرارة من النقاط الأسخن إلى النقاط الباردة) وتتحرك الرياح من مناطق الضغوط العالية إلى مناطق الضغوط المنخفضة، وتبدأ تيارات الحمل وهكذا نفس الطريقة التى تستخدم لحساب مدارات ثلاثة أجسام متجاذبة، أى خطوة خطوة، وكلما صغرت الخطوة كانت الحسابات أدق وهكذا. حساب الخواص الفيزيائية فى الحيز بين نقاط الشبكة هو عبارة عن متوسطات القيم عند نقاط الشبكة نفسها. رغم أن نتائج رتشاردسون كانت غير دقيقة بالمرة، ولكن لمْ يزعجه هذا، حيث إنه كان

يستخدم معلومات غير دقيقة ونقاط الشبكة متباعدة جدا. كان المهم إثبات أن الطريقة صحيحة وتصلح فعلا للتنبؤ بتغيرات الطقس.

لقد كان رتشاردسون متحمسا بدرجة أنه بدأ في وضع كتاب أسماه «تنبؤات الطقس باستخدام الطرق العددية». لقد انطمرت النسخة الأصلية من الكتاب أثناء الحرب ولكن وجدت بعد ذلك بعدة أشهر تحت كومة من الفحم، ثم نشر هذا الكتاب في عام ١٩٢٢م بعد أن أكمله رتشاردسون.

من الطريف أن رتشاردسون وضع تصورا لكيفية إجراء هذه الحسابات باستخدام ٦٤٠٠٠ شخص يستخدمون آلات حاسبة بدائية ويتصلون بعضهم بالبعض بواسطة ومضات ضوئية أو أنابيب هوائية ... وقد كتب الآتي: «ربما في يوم ما في المستقبل البعيد عندما تتقدم طرق الحسابات بأسرع من التقدم في الطقس بحيث تكون التكلفة أقل من الوفر بالنسبة للبشرية نظراً لأهمية المعلومات التي يتم الحصول عليها. لكن كل هذا حلم، مجرد حلم».

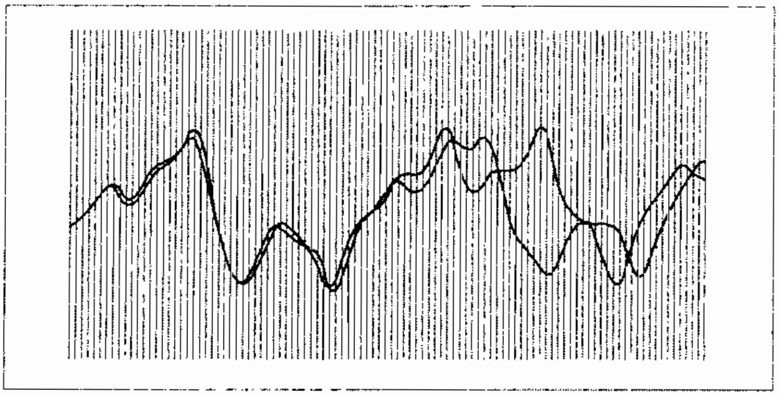
لقد تحقق الحلم قبل أن يتوفى رتشاردسون بثلاثين عاما، وأمكن إنجاز ما حلم به رتشاردسون بآلة واحدة وليس ٦٤,٠٠٠ آلة. لقد تحقق أول تنبؤ ناجح للطقس بواسطة الحاسبات في عام ١٩٥٠م. مع كل هذا النجاح الذي غمر القلوب بالنسبة للتنبؤات الجوية، في عام ١٩٥٩م ظهر عالم شاب في الثاني والثلاثين من عمره، عالم رياضيات وخبير أرصاد في معهد ماساتشوستس للتقانة واسمه إدوارد لورنتس، فقد كان كل خبراء الأرصاد يستخدمون نظما من المعادلات الخطية، واستطاع لورنتس أن يبني نظام محاكاة على آلة حاسبة (بدائية بالطبع؛ نظرا لذاكرتها الصغيرة جدا - حوالي ٤ كيلو بايت - أقل من شريحة في ساعة رقمية في الوقت الحالي)، ولكنه استطاع عند إجراء المحاكاة مع كل البساطة التي تميز بها الحاسب الذي استخدمه وبدون شاشة عرض - كل ما حصل عليه هو مجموعة أرقام والتي كانت مقربة إلى ثلاث خانات بعد العلامة العشرية لكي يستطيع أن يطبع ١٢ رقم على نفس السطر. مع ذلك استطاع أن يجري محاكاة لتغيرات الطقس خلال يوم في دقيقة واحدة، واستطاع لورنتس أيضا ببرنامج من وضعه أن يرسم نقاطا على ورق الطباعة بحيث عندما يوصل النقاط بيده يحصل على منحنى يبين تغيرات سرعة واتجاه الرياح وغيرها، وهنا حدثت مفارقة.

فكر لورنتس أن تمتد حساباته على النموذج المستخدم لفترة أطول، وبدلا من أن ينتظر حتى تعيد الآلة كل الحسابات، أضاف إلى البرنامج أمرا بحيث تبدأ الآلة الحاسبات من نقطة معينة شدت انتباهه، وذهب ليشرب فنجانا من القهوة، وغاب لمدة ساعة وعاد، ولدهشته وجد أن النتائج تتباعد وبشكل ملحوظ وواضح - في البداية

ظن أن الآلة بها عطب ما، ولكن مع إعادة الحسابات حصل على نفس النتائج؛ ولاحظ تباعد النتائج التى أوضحت تحولا خطيا بشكل كبير.

أدرك لورنتس وقتها ولحظيا ما حدث - إن الأرقام التى قام بطباعتها مقربة لثلاثة أرقام عشرية، ولكن داخل الحاسب تتم الحسابات مع أرقام ذات ست خانات عشرية، فمثلا عندما يطبع لورنتس الرقم 0.506 ، يكون داخل الآلة مثلا 0.506129 . لقد كانت حساسية النموذج عالية بالنسبة للشروط الابتدائية، لدرجة أن فارقا قدره ربع عشر واحد بالمائة جعل دورتين من الحسابات تتباعد عن بعضها البعض بعد فترة قصيرة نسبيا. وهكذا أحس لورنتس أنه إذا كان الهواء الجوى حساسا بهذه الدرجة فلابد من الاقتناع بأن استخدام هذه الطرق العددية فى تنبؤات الجو تصلح فقط للتنبؤ بالطقس لعدة أيام معدودة. أعلن لورنتس عن نتائجه هذه فى مؤتمر متواضع فى طوكيو فى ١٩٦٠م ولم يتنبه أحد إلى خطورة وأهمية هذه النتائج إلا بعد مرور فترة طويلة.

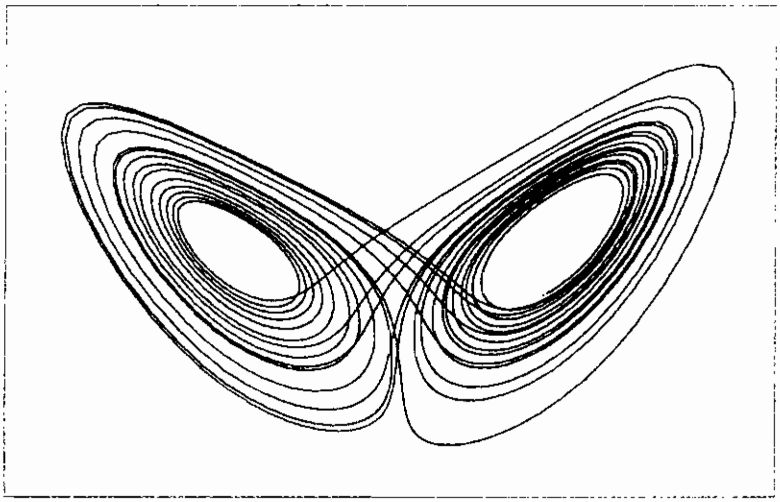
يمكن أن نضرب مثلا بتصور عن الفراغ الطورى على هيئة حوضين عميقين بينها حاجز رملى عليه طبقة ضحلة من الماء تصل الحوضين أحدهما بالآخر، فى هذه الحالة سوف تكون المسارات فى الفراغ الطورى عبارة عن مسارات دائرية فى أحد الحوضين، وبعض المسارات النادرة سوف تعبر الحاجز الرملى من أحد الحوضين للآخر، وتظل تدور وتدور إلى أن تعبر مرة أخرى الحاجز الرملى، وتعود للحوض الذى بدأت منه. فإذا لم نعرف بالضبط الحالات الابتدائية للمسارات فستظل المسارات تتجول بين الحوضين بشكل عشوائى.



شكل (٢-٢) مثلها مثل مدار قمر فى مسألة حركة ثلاثة أجسام، وجد لورنتس أن تنبؤات الحاسب لتقلبات الطقس (مثل درجة الحرارة) تتباعد بوحشية رغم أنها كلها تبدأ من بداية واحدة.

تبعا لذلك فإن حدود تنبؤات الطقس لكى تكون دقيقة فلن تزيد عن عشرة إلى أربعة عشر يوما، بالإضافة إلى هذا يمكن أن يتقلب الطقس من حالة مستقرة إلى حالة أخر مستقرة بشكل لا يمكن توقعه بالضرورة.

إن مسألة تحديد الشروط الابتدائية بدقة هى النقطة التى جذب إليها لورنتس الانتباه. تسمى أحيانا الحساسية الفائقة للأحوال الابتدائية بظاهرة الفراشة» والذى سك هذا التعبير لورنتس فى مؤتمر فى واشنطن عام ١٩٧٢م حيث قال «هل رفرفةجناح فراشة فى البرازيل يمكن أن تؤدى إلى تورنادو فى تكساس؟» طبعا فى الواقع هناك العديد من التغيرات والعوامل التى تجعل هذا القول غير صحيح وغير ممكن ولكنها بلاغة تقرب إلى الذهن حساسية النظم اللاخطية للأحوال الابتدائية. من الطريف أنه عندما نرسم صورة على شاشة حاسب مثلا للجاذب ذى الحوضين فإنه يكون على شكل فراشة كما فى شكل ٢-٣ . أصبح هذا الشكل كلاسيكيا معروفا لدى الجميع بأنه الشواش، وإن كان الشخص لا يعرف ما هو مرسوم بالضبط.



شكل (٢-٣) جاذب لورنتس (الفراشة)

إن الطقس يكون أكثر شواشية فى بعض الأحيان ومستقرا فى أحيان أخرى. لذا يلجأ خبراء الطقس فى إجراء الحسابات عدة مرات مع تغيير بسيط فى الشروط الابتدائية – عندئذ إذا كانت النتائج متقاربة يكون الطقس مستقرا وتنشر التنبؤات مع ثقة عالية، أما إذا كانت النتائج متباعدة، يعنى ذلك أن الطقس غير مستقر والتنبؤات غير واثقة . من الطريف أن أحد خبراء الطقس يضع هذه الحقيقة على الصورة الفكاهية التالية «إننا نستطيع أن نتنبأ بالطقس بدقة إذا لم يتغير الطقس بشكل غير متوقع» .

يمكنك أن ترى الشواش على حاسبك الجيبي: خذ التعبير $(2x^2-1)$ اختر × بين الصفر والواحد، مع عدة خانات عشرية – مثلا 0.2468 . إحسب النتيجة . خذ النتيجة واعتبرها قيمة × وأدخلها مرة أخرى واحسب النتيجة ثانية، سوف تحصل على مجموعة أرقام عشوائية رغم أن طريقة الحساب محددة تماما، وتخضع لقاعدة بسيطة جدا. والآن ابدأ مرة أخرى، لكن خذ رقما ذا أربع خانات عشرية ، ليكن 0.2469 ، وكرر الحسابات (يمكنك أن تضع برنامجا بسيطا على حاسب صغير ليؤدى نفس الغرض) سوف تحصل على مجموعة مختلفة تماما من الأرقام العشوائية بعد عدد ضئيل من العمليات التكرارية (iterations) – هذا بالضبط ما قام به لورنتس. الطريف أنك إذا استخدمت آلة حاسبة مختلفة، سوف تحصل على نتائج مختلفة لأن الآلات المختلفة تجرى بداخلها عمليات تقريب مختلفة.

لنأخذ مثالا آخر – لنأخذ العلاقة (x^2-1) ونجرى نفس الحسابات بنفس الطريقة، نحصل على مجموعة من الأرقام تتذبذب بين الصفر و (–١) . فى هذه الحالة يقال إن المجموعة دورية بدورة قدرها 2 ، حيث إن الأرقام تتكرر كل خطوتين – أى يعود النظام إلى قيمته الابتدائية . بالنسبة لنظم أخرى يكون عدد الخطوات مختلفا ولكنه ثابت لكل مجموعة، حيث تعود النتيجة لنفس القيمة الابتدائية. وهكذا نرى أن بعض القواعد البسيطة تؤدى إلى سلوك دورى وتتقارب من «جاذب»، ولكن قاعدة أخرى بسيطة تبدو شبيهة بالقاعدة الأولى، لكنها تفضى إلى نتيجة عشوائية حساسة جدا للتغيرات الطفيفة فى الحالات الابتدائية، مثل هذه النظم توجد فى كل مناحى الحياة من تساقط نقاط المياة من صنبور، إلى التغيرات الكبيرة فى أعداد وتجمعات الحيوانات المتوحشة أو تقلبات البورصة، من هنا نرى كيف أنه بدءاً ببساطة يظهر الشواش والتعقيد، قواعد بسيطة، لاخطية وحساسية للشروط الابتدائية تجعل نبض الحياة مستمرا.

قبل أن ننتقل إلى نظم أكثر تعقيدا، سوف نحاول أن ننهى موضوع مدارات الكواكب، حيث كانت بداية كل هذا:

لقد أثبت بوانكارية أن المجموعة الشمسية هى بالضرورة منظومة شواشية، ولكن الأرض مثلا مستقرة تماما فى مدارها ولمدة طويلة جدا، وإلا لم نكن نحن هنا نتعجب من مثل هذه الأمور.

تتكون المجموعة الشمسية من جسمين كبيرين وهما الشمس والمشترى ومجموعة كبيرة من الأجسام الصغيرة نسبيا، وآلاف آلاف الأجسام الصخرية الصغيرة جدا تعرف بالكويكبات والتى تدور فى حزام حول الشمس بين مدارى المريخ والمشترى.

تنقسم المجموعة الشمسية إلى مجموعتين يفصلهما هذا الحزام الكويكبى. تتكون المجموعة الأقرب للشمس من كواكب صخرية صغيرة هى: عطارد، الزهرة، الأرض والمريخ ، أما المجموعة الأبعد هى: المشترى، زحل، أورانوس ونبتون. السبب فى هذا التقسيم هو أنه عند تكُّون هذه الكواكب، أبعدت حرارة الشمس الفتية المادة الغازية بعيدا عن مركز المجموعة الشمسية. أمابعيدا عن حرارة الشمس فإن الغازات تكثفت على شكل هذه الكواكب الأربعة العملاقة. ولكن مازال تكون حزام الكويكبات لغزا حتى اليوم. إن النمذجة الحاسوبية والدراسات الأخرى تبين أن الأقراص الغبارية تتجمع وتكون حبيبات غبار تتجمع بدورها وتتكون حبيبات أكبر ثم قطع صخرية وهكذا، لكن فى المنطقة بين المريخ والمشترى أدت جاذبية المشترى إلى اضطراب فى هذه العملية قبل أن تكتمل ومنعت تكون كوكب كبير. تظهر النمذجة الحديثة أنه قبل أن ينمو المشترى إلى حجمه تكونت ستة أو سبعة كواكب مثل زحل (كتلته عشر كتلة الأرض) ولكن تحت تأثير الجاذبية الضخمة للمشترى تصادمت هذه الكواكب وبعنف بحيث تكوّن حزام الكويكبات تاركة كوكب زحل ينجو بمفرده.

فى السبعينيات من القرن العشرين بدأ طالب الدكتوراه فى معهد كاليفورنيا للتقانة واسمه جاك وزدم (Jack Wisdom) فى دراسة مدارات هذه الكويكبات باستخدام طريقة مطورة فى الحسابات وأفضل حاسب متاح فى ذلك الوقت. مع ظهور النتائج اتضح أن مدارات هذه الكويكبات داخل الحزام المذكور ليست موزعة بشكل متجانس، وإنما هناك فراغات بين هذه المدارات، تسمى هذه المناطق الفارغة بفواصل كيركوود (Kirkwood) . لقد وجد كيركوود أن هذه الفواصل ما يسمى «مناطق رنين» بمدار المشترى نفسه. ولكن قبل تجارب وزدم لم يكن واضحا لماذا تظل هذه الفواصل فارغة.

إن الرنين مثلا لأرجوحة هو رد فعل كبير، عندما تتأرجح لمسافة كبيرة نتيجة دفع بسيط ولكن فى توقيت صحيح . هنا يقوم المشترى بدفع الكويكبات ويعطيها هذا الدفع كل مرة تقترب منه خلال حركتها بين المشترى والشمس.

بالنسبة لمعظم المدارات تكون هذه الدفعات صغيرة وفى أوقات مختلفة، بحيث يكون التأثير النهائى ضعيفا. لنفرض أن كويكبا يدور حول الشمس ويتخذ مدارا يساوى بالضبط ضعف مدار المشترى نفسه. عندئذ يأخذ الكويكب دفعة من المشترى فى نفس الجزء من مداره، وفى هذه الحالة يندفع الكويكب بعيداً عن المشترى. لم يكن هذا ذا قيمة كبيرة إذا حدثت دفعة ثم يعود الكويكب إلى مداره مرة أخرى مثلما يحدث مع المشترى نفسه وزحل كما قال لابلاس . ولكن إذا كان المدار

حساسا لكل هذه الاضطرابات فسوف يدفع هذا الرنين بمدار الكويكب من مدار دائرى مثلا إلى مدار على شكل قطع ناقص حول الشمس، ثم يعود إلى نفس نقطة الرنين حول المشترى هذا هو ما توصل إليه وزدم ونشره فى عام ١٩٨٢م. هنا نرى الشواش فاعلا فى حزام الكويكبات، خاصة للمدارات ١-٣ من المدارات الرنينية حول المشترى.

لا يمثل كل هذا حلا لهذا اللغز؛ لأن الشواش كما يعمل على دفع الكويكبات يمكن أن يعمل على جذبها فى الاتجاه الآخر، وخاصة أن بعض الكويكبات تأخذ مسارات تتقاطع أحيانا مع مدارات الكواكب الداخلية فى المجموعة الشمسية، حتى أنها تتصادم مع بعض هذه الكواكب بما فيها الأرض.

وفعلا لوحظت بعض الندبات على أسطح هذه الكواكب حتى أن هناك اعتقاد بأن أحد هذه الكويكبات اصطدم بالأرض منذ ٦٥ مليون سنة وأدى لانقراض الديناصورات وظهور الثدييات بما فيها نحن البشر، يعنى هذا أننا مدينون للشواشى فى حزام الكويكبات بوجودنا نحن على الأرض، ويعنى هذا أن نهاية كل هذه الحضارة يمكن أن تنتهى بنفس الطريقة.

ربما يعطينا الإحساس بالراحة عندما نعلم أن نهاية الحياة على الأرض لن تأتى من انحراف مدار الأرض بحيث تندفع للاقتراب من الشمس أو فى عمق الفضاء الكونى السحيق عبر السنين، منذ عام ١٩٨٢م وعلماء الرياضيات والمبرمجون يطورون البرامج السريعة لآلات حاسبة أسرع وأسرع لكى يتنبئوا بمستقبل أو السيناريوهات المحتملة لمستقبل المجموعة الشمسية، بل ويسكون مسميات طريفة لمشروعاتهم منها مثلا: «الوقفة الطويلة» LONG – STOP (Long-term Gravitational Study of Outer Planets) ومشروع (Digital Orvery) وأورير تعنى نموذجا ميكانيكيا (كالساعة) للمجموعة الشمسية. بعض هذه المشاريع تأخذنا إلى مئات الملايين من السنين فى المستقبل. كل هذه البرامج تؤكد أنه رغم كون مدارات كواكب المجموعة الشمسية شواشية وخلافا لمدارات الكويكبات فى فراغات كيركوود، فإنه لن يحدث اضطراب فى مسارات هذه الكواكب إلى نهاية عمر الشمس والذى يقدر بخمسة بلايين سنة أو ما يقرب من ذلك . كل هذه البرامج لا تتنبأ بمدار الأرض أو غيرها من الكواكب، فهى وإن كانت حساسة للشروط الابتدائية إلا أنها حساسية محدودة. لقد طور چاك لاسكار (Jack Laskar) الذى يعمل فى "Bureau de Longitudes" فى باريس برنامجا يبين أن الأرض سوف تتبع نفس مسارها الحاضر لمدة لن تقل عن مائتى مليون سنة (حد عمليات الحسابات التى يقوم بها البرنامج) . أوضح البرنامج أن خطأ فى كل خطوة بمقدار

١٥ مترا يعطى بعد ١٠٠ مليون سنة مدارا للأرض مقداره ٩٥٠ مليون كيلو متر. ثمة جانب مهم فى هذه الحسابات أنه عند إجرائها لمدة ١٠٠٠٠٠ عام ثم نعكس هذه الحسابات لا نعود للقيم الابتدائية، لكن إذا كان النظام مستقرا فلابد من العودة بالقرب من القيم التى بدأنا بها، ومن كل هذا نستنتج أن هذه النظم وإن كانت تخضع لقوانين صارمة، إلا أنها لا انعكاسية، ولكن عندما يستقر النظام، فيمكن القول بأن النظام يتواجد فى منطقة محدودة من الفراغ الطورى وأيضا فى الفراغ الحقيقى، أى أنه شواش يقينى.

يمكن أن نورد مثالا قريبا وهو: سلوك كرة عجلة الروليت حين يتم قذفها، ولكن قبل أن تستقر فى إحدى الحفر، إنها تقفز بشكل عشوائى، ولكن كل مساراتها محددة داخل حافة العجلة (مع افتراض أن القاذف قد أدى عمله بشكل صحيح) كذلك مثل آخر: حين يلجأ شخص ما إلى التخلص من مشكلة اختيار زوج جوارب فى الصباح بأن يشترى جوارب خضراء فقط، إنه يعلم أنه عند اختيار أى زوج جوارب من الدرج فسوف يكون زوج الجوارب أخضر، وإن كانت الجوارب مختلفة الصنع والشكل حتى وهو مغمض العينين فسوف يقع اختياره دائما على زوج جوارب أخضر، وبالتأكيد لن يكون أحمرا.

هنا لابد أن نذكر شيئًا وإن كان بعيدا عن سياق قصتنا: يؤمن البعض أن الكواكب الداخلية فى المجموعة الشمسية قد غيرت مداراتها، وبالأخص كوكب الزهرة، ويرتبط بذلك بعض الأساطير والحكايات الخيالية. كل هذا يرتبط بمحاولة تفسير هذه الأساطير ولكنه يهمل تماما قانون انحفاظ كمية الحركة الزاوية. ربما تمثل هذه الأساطير مادة لتفسير (أو حتى إثبات) أن الزهرة موجودة فى مدارها الحالى ليس من مدة طويلة، ولكن الحسابات التى أُجريت لا توضح أين كانت الزهرة منذ خمس ملايين سنة قبل الميلاد. كل هذا يؤكد أنه لا الزهرة ولا أى كوكب آخر قد تعرض لاضطرابات كبيرة فى مداره منذ (وبتحفظ) خمس ملايين سنة.

ثمة موضوع آخر مهم يتعلق بالكواكب، فكل الكواكب تدور حول محاورها وتترنح خلال هذا الدوران، يمكن أن يحدث رنين بين زمن دورة الدوران وزمن دورة الترنح والذى يؤدى إلى تغير كبير فى زاوية ميل الكوكب. يمكن أن يحدث هذا نتيجة تباطؤ دوران الكوكب فيدخل فى منطقة حساسة من الفراغ الطورى. إن ميل الأرض على الخط الواصل بينها وبين الشمس مقداره ٢٣° ، وهذا هو سبب تتابع الفصول، وجد أن وجود القمر يثبت قيمة هذا الميل ويمنع حدوث اضطرابات كبيرة به. بالنسبة للمريخ ورغم وجود قمرين إلا أنهما لا يستطيعان أن يثبتا ميله، وبالتالى

فإن ميل المريخ يتأرجح بين ±٢٠° فى حين ميله نفسه ٢٤° كما بينت ذلك التجارب النمذجية (Simulations) . يمثل هذا برهانا مباشرا على التغيرات الدرامية فى المناخ على المريخ التى حدثت فى الماضى، على هيئة ما يبدو أنه أنهار جفت والتى «نظفت» المناطق الجافة الآن على سطح الكوكب الأحمر. هذه التغيرات الكبيرة فى المناخ ربما ترتبط بفترات زمنية ماضية عندما كانت المنطقة القطبية تطل على الشمس، حيث تولدت كمية كبيرة من الحرارة صهرت أو حتى بخرت القلنسوة القطبية المكونة من الماء وثانى أكسيد الكربون المتجمد.

ربما يكون نفس الشيء حدث لكل من الزهرة وعطارد ولكن لا توجد أية آثار على سطحى الكوكبين، حيث إنه لا يوجد غلاف جوى لعطارد، وأما بالنسبة للزهرة فقد تأثر سطحها بالنشاط البركانى الشديد بها .

كل هذا يترك الأرض مستقرة، مما يدعو للسرور. ولكن على المدى الطويل جدا عندما ينحسر القمر عن الأرض نتيجة قوى المد والجذر، وبالتالى يبدأ ميل الأرض فى التغير بشكل كبير، وربما يصل إلى ٩٠° ، عندئذ سوف يكون الجو حارا عند القطب كما هو حار الآن عند خط الاستواء، وعند القطب الآخر سوف يكون شتاء قارسا، وبعد ستة أشهر تنعكس الصورة. بهذا تتغير صورة الحياة على الأرض كما نألفها الآن ورغم أن الشواش كان السبب الأساسى فى وجودنا حيث نحن الآن، فإن غياب الشواش، ويرجع الفضل فى ذلك لوجود القمر، أتاح كل ذلك تطور الحياة على الأرض بملايين السنين حتى وصلت إلى ما نراه الآن. كذلك فإن أفضل اقتراح لتفسير وجود قمر كبير قرب الأرض هو أن كويكبا خرج من مداره أثناء تكون الأرض واصدم بها وفصل الأجزاء المنصهرة التى كونت القمر فيما بعد.

هناك نقطة أخيرة – ربما كانت أهم نقطة على الإطلاق، ولابد من الإشارة إليها قبل أن نترك المجموعة الشمسية: لقد أوردت قبلا أنه عند إجراء الحسابات لحساب مدارات الكواكب، ثم نعكس هذه الحسابات، فإننا لا نعود لنفس القيم التى بدأنا بها، أى أن المدارات ليست انعكاسية، وطالما أن كل هذا فن عن كيفية إجراء الحسابات، لا يغير هذا من تفكيرنا حول ماهية الكون؛ حيث أن قوانين نيوتن انعكاسية من حيث المبدأ. ولكن كيف يقوم الكون بعمل هذه الحسابات؟ مثل لابلاس فإن هناك نوع من الذكاء (سواء كان حيا أو إلكترونيا) الذى يحفظ كل المعلومات عن كل الخواص ذات العلاقة (مثل موضع وكمية حركة كل جسيم) وبذلك يقوم بإجراء الحسابات وبشكل تام فى هذه الحالة، وبالتأكيد لابد أن تكون انعكاسية، ولكن كم من الخانات العشرية نحتاج لكى تكون الحسابات تامة (perfect)؟ ما هو حجم الذاكرة المطلوبة لهذه الحاسبات التامة؟

لأول وهلة يبدو هذا السؤال مستحيلا، وإن كانت الإجابة - كما ثبت - بسيطة جدا ومرتبطة بطبيعة الأرقام ذاتها.

عندما يتحدث معظم الناس عن الأعداد فإنهم تلقائيا يتحدثون عن الأعداد الصحيحة مثل ١، ٢، ٢٧، ٤٤، ١٩٩ وهكذا. كما أننا معتادون على الكسور البسيطة مثل $\frac{١}{٢}$، $\frac{١}{٣}$، $\frac{٣}{٤}$.

بالنسبة للكثير من أوجه الحياة يكفى هذا تماما، وعندما نستخدم الأجزاء العشرية يكون ذلك مرتبطا بالنقود، حيث نضرب مثلا عندما نقول ١٧,٤٦ دولارا يعنى هذا سبعة عشر دولارا صحيحا وستة وأربعون سنتا.

لكن هناك عدد لا نهائى من الأعداد لا يأتى ذكرها فى الحياة اليومية، الأسوأ من هذا أن هناك عددا لا نهائيا من الأعداد المحصورة بين أى عددين نفكر بهما، وهذا صحيح أيضا بالنسبة للأجزاء العشرية، فبين العددين ١و ٢ يوجد أعداد ذات خانة عشرية واحدة مثل ١,١ ، ١,٢ ، ١,٣ ... وهناك بين كل عددين من هذه الأعداد يوجد عدد لا نهائى من الأعداد التى تحوى خانتين عشريتين مثل ١,١١ ، ١,١٢ .... وهكذا وهكذا، حتى بين العدد ٢٤٧,٨٥٠٣٤٦٨٢٩٥٦٦٧ والعدد ٢٤٧,٨٥٠٣٤٦٨٨٢٩٥٦٦ ، أو يوجد عدد من الخانات العشرية يكفى لملء هذا الكتاب وتختلف فقط فى العدد العشرى الأخير، ويمكن أن يكون العدد كبيرا بدرجة أن يملأ الكون كله.

لم يكن كل هذا ليقلقنا لو كان كل ذلك مجرد حسب استطلاع رياضيتى، نعلم الآن أن بعض المتسلسلات تتميز بسلوك جيد ويمكن أن نعبر عنها بشكل بسيط إن الكسر $\frac{١}{٣}$ يعبر عن عدد لا نهائى من الرقم ٣ بعد العلاقة العشرية أى ٠,٣٣٣٣٣٣٠٠٠٠٠ ولكن يمكننا أن نكتبها بشكل مبسط (مضغوط) دون أن نملأ الكون بعدد لا نهائى من العدد ٣ . هناك نوع آخر من الكسور العشرية يمكن التعبير عنها بشكل مضغوط فالعدد ٠,٦٧٥٤٨٦٧٥٤٨٦٧٥٤٨ يمكن الحصول عليه بتكرار كتابة العدد ٦٧٥٤٨ إلى مالا نهاية. إن التعبير عن شيء ما كبير جدا يستحيل احتواؤه، نعبر عنه بشكل بسيط يسمى بالألغاريتم (Algorithm) . يمكن التعبير عن هذا إما على شكل كلمات أو تعبير رياضى بسيط، وفى هذه الحالة نقول إن التعبير الرياضى قابل للضغط ألغاريتميا. حتى قدماء اليونان والذين لم يتوصلوا إلى الأرقام العشرية تنبهوا إلى وجود أعداد ليس من السهل التعبير عنها بصورة مضغوطة (compact)، الأسوأ من ذلك إن معظم الأعداد لا يمكن وضعها على هذه الصورة.

إن الأعداد التى يمكن وضعها بكل مبسط هى النسبة بين الأعداد الصحيحة مثل $\frac{١}{٣}$ ، $\frac{٢٩٨٤٧}{٦٥١٠٩}$.

حتى الأعداد الصحيحة هى كسور فى واقع الأمر، فالعدد $\frac{٢}{٢} = ١$ ، $\frac{٨}{٤} = ٢$ وهكذا. ولأن مثل هذه الأعداد يمكن أن تأخذ شكل كسر سُميت بالأعداد الكسرية (rational) ولكن هناك أعداد مثل العدد ط (π) والذى لا يمكن وضعه على شكل كسر، لذا تسمى مثل هذه الأعداد بالأعداد اللاكسرية irrational . هذا هو قلب مشكلة الشواش والانعكاسية حسب نيوتن (أو لابلاس) كما نرى عندما نحاول تحديد موضع أى نظام فى الفراغ الطورى.

يمكن أن يكون «النظام» بسيطا مثل جسيم منفرد يتحرك فى صندوق تحت تأثير الجاذبية، تتحدد حالة الجسيم حسب موضعه وكمية حركته، وقد أثبت نيوتن أن الجسم سوف يتحرك وكأن كتلتة الكلية تتركز فى نقطة رياضية عند مركز الجسيم (مركز الثقل)، ما علينا إلا أن نحدد موضع الجسيم فى الفراغ الطورى، ولكن لنركز اهتمامنا على الموضع حتى نبسط المسألة أكثر، وحتى يمكن أن نبسط المسألة أكثر وأكثر بأن نفترض أن الجسيم يتحرك فى خط مستقيم – ليكن سقوطا حرا فى مجال الجاذبية، ما علينا الآن هو تحديد موضع الجسيم على هذا الخط المستقيم وهذه أبسط المسائل التى يمكن تصورها فى الفيزياء ولكن حتى هذه المسألة مستحيلة، عدا حالات نادرة جدا – كيف؟

لنفرض أننا نعلم أن الجسيم بين نقطتين (A, B) ونود أن نعرف بالتحديد وبدقة ماهى نسبة المسافة بين نقطتى A , B التى قطعها الجسيم. ليس هناك مشكلة إذا كانت النسبة هى $\frac{١}{٣}$ ، أو $\frac{٩٨}{٣١٧}$ ... أو أى كسر آخر، ولكن بين كل زوجين من الأعداد الكسرية يوجد عدد لا نهائى من الأعداد اللاكسرية، وأى من هذه الأعداد لا يمكن التعبير عنه إلا بعدد لا نهائى من الأرقام ولا يمكن التعبير عن ذلك بشكل مضغوط، فمثلا إذا كانت نسبة المسافة التى قطعها الجسم هى $(\frac{١}{\pi})$ على الخط الواصل بين النقطتين (A, B) فيمكننا التعبير عن هذه المسافة بعدد عبارة عن كسر عشرى به عدد من الخانات كيفما نريد وبالدقة التى نريدها، ولكن ليس بالتأكيد بدقة «تامة»، إلا إذا استخدمنا عددا لا نهائيا من الأرقام. كل هذا بالنسبة لجسيم واحد على خط مستقيم بين نقطتين معرفتين. ماذا عن نظام حساس للشروط الابتدائية؟ فى أى حالة سوف يعتمد مستقبل هذا النظام؟ دائما مهما أخذنا من أرقام فسوف يعتمد على الرقم التالى، والذى غضضنا النظر عنه فى الواقع.

يعنى هذا أنه يلزم حاسب ذو ذاكرة لا نهائية لحساب موضع جسيم وحيد. بالطبع لابد من حاسب أكبر من الكون نفسه، وإذا عرفنا الكون بأنه «كل شىء هناك»، يعنى هذا أن النظام الوحيد الذى يمكن أن يحاكى سلوك الكون بكل التفاصيل هو الكون نفسه، وحتى لو كان الوضع كما قال لابلاس: إن الكون محدد

تماما (يقينى) (deterministic) – وإن كل المستقبل موجود فى الحاضر، فلا توجد طريقة لمعرفة المستقبل غير متابعة كيف يتطور الكون نفسه، بصرف النظر عما إذا كانت إرادتنا حرة أم لا – فإن الكون يتصرف كما لو كانت إرادتنا حرة، وهذا فى الواقع الأمر المهم فى كل الموضوع.

ولكن ماذا بالنسبة للانعكاسية وسهم الزمان؟ يتحدث الناس وبسهولة عن «االعصا السحرية» التى تعكس كل حركات الجسيمات فى الكون (أو فى صندوق يحوى غازا) حتى يجرى الزمن فى الاتجاه المعاكس، ولكن كما نرى فإن ذلك مستحيل.

وحتى لو تركنا جانبا النظرية النسبية والتى تثير أسئلة أساسية مثل «إن كل حركة فى الكون يمكن عكسها آنيا» فى حين كل الإشارات لا يمكن أن تنتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء وعن الآنية ذاتها، كل ذلك يعتمد على موضع المراقب فى الكون. لهذا كله يستحيل انعكاس حركة حتى جسيم وحيد منفرد. لكى تفعل ذلك لابد وأن تحدد موضع الجسيم باستخدام عدد لا نهائى من الأرقام (فقط فى حالات نادرة جدا عندما تكون المسافة التى قطعها الجسم ممثلة بعدد كسرى بسيط، وعندئذ فقط يمكن أن نعكس حركتها بدقة تامة . واضح أن هذا مستحيل، ليس فقط لانعدام المقدرة من جهة الإنسان، هذا ناتج عن استحالة تجنب الشواش – **لا يمكن التنبؤ بمستقبل الكون بكل تفاصيله، وبالتالى فإن الزمن لا يمكن عكسه.**

إن الأفكار التى وردت فى هذا الباب هى الأساس الراسخ – البساطة العميقة – والتى يستند عليها تعقد هذا الكون. انطلاقا من هنا – يمكن أن ننتقل نحو الطبيعة المعقدة لهذا الكون، للحياة نفسها والتى نشأت عن الشواش. إذا كنت تعرف الشواش والهندسة الكسرية يمكنك الانتقال مباشرة إلى الباب الرابع، ولكن من الأفضل أن تصحبنا فى هذه الرحلة القصيرة والهامة فى عالم الشواش والأشكال الكسرية ،التى أصبحت دعامة الشواش. ليست رحلة فى أمور بعيدة وإنما هى متلامسة مع ما نعرض، بل وتتشابك معه – وهى أمور الحياة ذاتها، أى محور كل نقاشنا.

الباب الثالث

الشواش الناتج عن الانتظام

إن الشواش الذى نتحدث عنه الآن يختلف عن الشواش الذى كان القدماء يظنونه، وغير الذى نستخدمه فى حياتنا اليومية، ذلك النوع من الشواش عشوائى تماما وغير قابل للتنبؤ، لكن نوع الشواش الذى نتحدث عنه هنا هو محدد تماما (determinstic) ومنتظم بحيث تعتمد كل خطوة على سابقتها، وعبارة عن سلسلة متصلة من الأسباب والأحداث، وبالتالى يمكن التنبؤ بالنتائج على الأقل من ناحية المبدأ. سوف نعطى مثالا واقعيا وبسيطا وهو الانسياب الدوامى (الانسياب الاضطرابى) (turbulence) حيث يتغير شكل الانسياب مع زيادة السرعة.

لنتصور نموذجا بسيطا، عبارة عن نهر ينساب به الماء. عندما توجد صخرة تبرز قمتها على سطح الماء نجد أن الماء ينساب حول هذه الصخرة فى تيارين منفصلين يتحدان مرة أخرى بعد الصخرة، وعندما تزداد سرعة الانسياب فإنه يمكن تمييز ثلاث مراحل: بازدياد السرعة تتكون دوامات خلف الصخرة وتظل فى مكانها بحيث إذا كان بالتيار قطع خشبية صغيرة فإنها سوف تدور وتدور لوقت طويل فى مكان الدوامات – هذا شيء قريب من «جاذب لورنتس» فى الفراغ الطورى، فى المرحلة الثانية عندما تزداد سرعة التيار أكثر ، تتكون الدوامات ولكنها لا تبقى فى مكانها وتتحرك مع التيار وتتكون غيرها بعد الصخرة وهكذا.

عند ازدياد الانسياب تصغر الدوامات وتتكون وتختفى وبسرعة، مما يجعل سطح الماء مضطربا باضطرابات غير منتظمة، ولكن إذا إزدادت السرعة أكثر وأكثر تختفى سمة الانتظام على الانسياب ويصبح شواشيا تماما.

وهكذا يمكن أن نشير إلى سمتين هامتين فى طريق التحول من الانتظام إلى الشواش، والتى يوضحها الانسياب الدوامى (turbulence) . إن هناك شيئا ما يتغير – وإن كان ذلك يبدو بديهيا لكن هذه مسألة مركزية بالنسبة للأمر كله. إن نظاما ما يمكن وصفه بطريقة بسيطة فى بعض الأحوال، يصبح معقدا جدا فى أحوال أخرى – فى هذ الحالة تكون الدوامات. شيء واحد يتغير وهو سرعة الانسياب، عند ازدياد هذا المتغير إلى قيمة حرجة، فهذا كافى لظهور الشواش – بمراقبة كيفية تفتت الدوامات خلف الصخرة خلال المرحلة الانتقالية بين الانتظام والشواش نجد أن شيئا ما طريفا يحدث. يحتاج هذا الاكتشاف إلى تركيز ذهنى عال دون أجهزة معقدة. لقد شد ليوناردو دافينشى الانتباه إلى هذا منذ خمسمائة عام. لقد قال إن الدوامات

التى تنفصل عن الصخرة لا تختفى ولكنها تتكسر بداخلها إلى دوامات أصغر والتى تتكسر بدورها إلى دوامات أصغر وأصغر، أى دوامات داخل دوامات، داخل دوامات أى أنها عملية تشعب (Bifurcation) .

هناك مثل آخر هو سقوط قطرات من الماء من فوهة صنبور إذا كان الصنبور مغلقا وفتح قليلا جداً سوف تشاهد قطرات الماء تتساقط من فوهة الصنبور والتى يمكن تمييز صوت اصطدامها بالحوض على شكل دقات متتالية (drip - drip) . فى هذه الحالة يقال إن زمن دورة النظام هو الوحدة (1) ، وإذا فتح الصنبور أكثر بقليل يتحول الصوت إلى دقتين (... rat - tat, rat - tat) ويقال فى هذه الحالة إن للنظام زمن دورة (2) ، ثم إذا فتحنا الصنبور أكثر قليلا سوف تحدث أشياء ظريفة ثم تتشوه تماما. بعد ذلك يمكن سماع أصوات ذات دورة رباعية أى rat - a - tat - tat) rat - a - tat - tat) وهكذا هذه الحالة يمكن تمييزها فى المختبر، حيث يمكن التحكم فى فتح الصنبور بدقة عالية - (لقد حاولت ذلك فى البيت وسمعت فعلا مثل هذه الدورة الرباعية ولكنى لست متأكدا أننى سمعتها لأنى أقنعت نفسى بأنها تحدث هكذا بالفعل). تسمى هذه العملية «مضاعفة الدورة» أى تزيد الدورة فى كل مرة إلى الضعف، ولكن لا يمكن أن يستمر كل هذا إلا مالا نهاية - بعد قليل ينتقل النظام إلى حالة الشواش ويصبح الصوت غير منتظم. إذا ازدادت فتحة الصنبور يسيل الماء على شكل انسياب منتظم ، وإذا زدنا الفتحة يتحول إلى الانسياب الدوّامى (turbulent) .

يمكن أن نعطى مثالا آخر من فرع مختلف من العلوم لنوضح كيف أن الشواش ظاهرة منتشرة فى كل أفرع العلم، لنفرض أن حشرة يموت كل الجيل كامل النمو فى الشتاء بعد أن يضع البيض الذى يفقس ليعطى جيلا جديدا فى الربيع التالى، لنبدأ بجيل يحوى العدد x من الحشرات، إن عدد الحشرات فى الجيل الجديد يعتمد على عدد البيض الذى يفقس (معدل الولادة) والذى يعتمد على عدد البيض الذى تم وضعه، وهكذا فى المتوسط إذا وضعت حشرة عدد (B) من البيض، سوف يكون عدد المواليد (BX) - بالطبع يستثنى من هذا تلك الحشرات التى ماتت نتيجة نقص الغذاء أو غير ذلك من العوامل وبالتالى لا تضع بيضا، يعتمد معدل الموت هذا على العدد الأصلى للحشرات وكلما زاد العدد يصبح من الصعب أن تجد كل الحشرات غذاء كافيا. يمكن أن نضع حدا أقصى لعدد الحشرات بأن نحسب عدد حشرات المن (aphid) فى شجرة ورد واحدة (rosebush) ونقسم عدد الحشرات الكلى على هذا العدد بحيث يقع العدد (x) بين الصفر والواحد. تسمى هذه العملية بعملية الأسواء - (renormalization) - ولكى نأخذ فى الاعتبار

معدل الوفيات المبكرة، نضرب العدد (BX) بمعامل هو (1–x) إذا كان عدد الحشرات فى البداية (population) قريبا من الصفر وليس بالضرورة صفرا، فإن كل حشرة سوف تحيا وتجد غذاء كافيا، وهكذا يكون معدل النمو هو BX ، ولكن إذا كان عدد الحشرات فى البداية كبيرا جدا تكون (x) قريبة من الوحدة و(1–x) قريبة من الصفر وتموت معظم الحشرات من الجوع أو تقع فريسة لأعدائها . بين هاتين الحالتين، يزيد عدد الحشرات أو ينقص من جيل للذى يليه. يعتمد ذلك على معدل المواليد (B) ، ويمكن أن نرى كيف سيتغير عدد الحشرات لقيم مختلفة لمعدل المواليد (B) إذا أجرينا حسابات تكرارية (iteration) للتعبير الرياضى:

$$x\ (next) = BX\ (1 - x)$$

حيث (next) X تعبر عن الجيل التالى، إذا بسطنا الطرف الأيمن فى هذا التعبير سوف نجد أن:

$$x\ (next) = BX - BX^2$$

ونلاحظ العلاقة اللاخطية فى هذه المعادلة، وسميت بالمعادلة اللوجستية (Logistic equation) .

كما نلاحظ وجود تغذية خلفية (feedback) من خلال الإشارة السالبة فى العلاقة نفسها.

إذا كانت قيمة (B) أقل من الوحدة فلن يكون هناك أى تكاثر؛ حيث يترك كل فرد أقل من وريث وبالتالى يؤدى هذا إلى فناء النوع مهما كانت قيمة (X) . إذا كانت قيمة (B) أكبر من الوحدة نحصل على نتائج ذات أهمية. منذ الخمسينيات فى القرن العشرين وعلماء التوازن البيئى (Ecology) يفعلون ذلك بالضبط، ولكن نظرا للإمكانات الحاسوبية المحدودة المتاحة لهم، ركزوا جهودهم على العلاقات بين مجموعات الكائنات وكيف يؤثر بعضها على البعض، كذلك فعل علماء الهيدرو-دناميكا، حيث ركزوا على الحالات التى تتكون فيها الدوامات (خلف الصخرة فى النهر) ثم تختفى تلك الدوامات، ولم يتطرقوا لمشكلة الاضطراب (Turbulence) .

إذا كانت قيمة (B) بين الواحد والثلاثة- يتكون جاذب لهذه العلاقة – عندئذ مهما كانت قيمة X بين الصفر والوحدة، سوف يستقر عدد الأفراد بعد مدة معينة عند عدد ثابت. تزداد هذه القيمة قليلا بازدياد (B) ، وإذا كانت قيمة B قريبة من 3 ولكن أقل منها، تؤول فيه X إلى 0.66 ، أى قرب ثلثى العدد الابتدائى، ربما يبدأ بعدد كبير ثم ينخفض ثم يتذبذب حول هذه القيمة، أو يبدأ بعدد صغير ويكرر نفس السلوك. إذا بدأنا بقيمة كبيرة للعدد (X) فسوف يأخذ الاستقرار وقتا أطول

وهكذا، ولكن طالما كانت فيه B أقل من ثلاثة فسوف تؤول قيم X فى النهاية إلى قيمة الجاذب. **لكن إذا وصلت قيمة B إلى (٣) – يحدث شىء مختلف تماما.**

عندما تتجاوز قيمة B العدد (٣) بقليل تتغير الصورة تماما عند إجراء حسابات تكرارية بعدد كبير من الخطوات، يتنقل عدد «الأفراد» بين رقمين متباعدين جيلا بعد جيل. لقد تشعب الجاذب إلى جاذبين وتضاعف زمن الدورة من (1) إلى (2). يمكن فهم ذلك بأنه إذا بدأنا بعدد كبير فإن نسبة عالية من هذا العدد تموت نتيجة الجوع؛ إذ لا تجد ما يكفيها من الغذاء، وبالتالى فينقص عدد الجيل التالى، وبالتالى يجد ما يكفيه من الطعام ويتكاثر بشكل كبير ويزداد عدد الجيل التالى وهكذا. إذا رسمنا الأرقام التى نحصل عليها نجد أن الشكل الناتج قريب من شوكة رنانة وضعت على جانب من جنبيها – أى واضح شكل التشعب الثنائى (Bifurcation) .

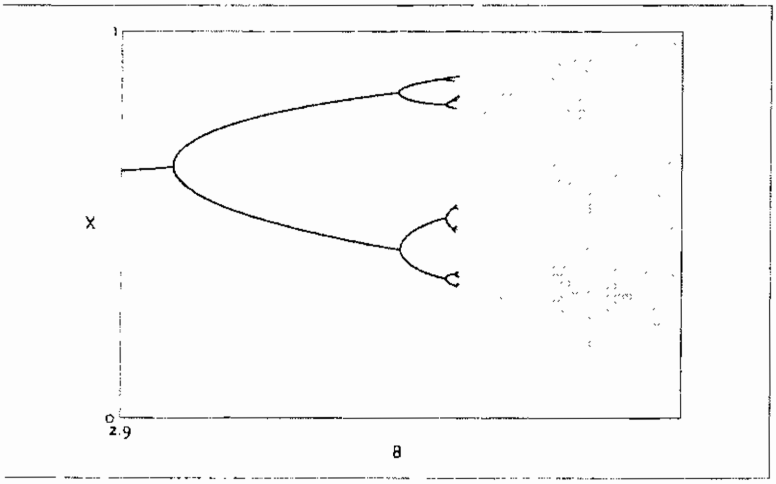
إن إجراء هذه الحسابات عملية مملة جدا، خاصة أنه بالقرب من B = 3 لابد من أخذ قيم متقاربة جدا لكل من B , X . كان روبرت ماى (Robert May) وهو من أصل أسترالى وبدأ فيزيائيا وتحول إلى علم التوازن البيئى (Ecology) ، وقد عمل فى جامعة برنستون فى سبعينيات القرن العشرين، كان ماى فى ذلك الوقت فى الثلاثينيات من عمره، وكان محظوظا فى تطبيق قوانين الرياضيات والفيزياء فى علوم الحياة، وأيضا فى استخدام الحاسبات فى ذلك الوقت ذات القدرة الكافية لإجراء كل هذه الحسابات فى وقت قصير نسبيا.

من المنطقى أن نرى ماذا يحدث عندما تتجاوز قيمة B العدد (3) . عندما تكون B = 3.4495 ينشط أحد فرعى الشوكة مرة أخرى إلى فرعين وتتذبذب النتائج بين أربع قيم مختلفة، أى زمن الدورة هو (٤) . عندما نأخذ B = 3.56 ، ينشطر كل من هذه الجاذبات مرة واحدة وهكذا. من الصعب على أى عالم فى علوم الحياة أن يستوعب معنى تذبذب عدد الأفراد بهذه الطريقة بين هذا العدد الهائل من القيم . من أعمال ماى أصبح واضحا أنه عندما تكون B = 3.56999 يصبح عدد الجاذبات لا نهائيا، أى أن أى دارس لتغيرات عدد الأفراد من جيل للذى يليه يرى بوضوح تام الشواش محددا وأصيلا (genuine) .

ولكن هناك الأكثر من هذا – بين كل القيم التى نحصل عليها عندما تكون B أكبر من 3.56999 نحصل على مناطق بها انتظام تام – أى كأنها نوافذ بين القيم الشواشة الملتبسة. عندما تكون B بين القيم 3.8 ، 3.9 نحصل على سلوك يناظر سلوك النظام عندما تكون B أقل من (3)، ولكن ما إن تزيد قيمة B قليلا عن 3.9 حتى تعود مرة أخرى للتشعب وتضاعف الدورة وهكذا. ورغم تناظر الأشكال إلا أنها تتم على مقياس رسم أصغر فأصغر، مثلها مثل العرائس الروسية(*) .

(*) العرائس الروسية هى عرائس مفرغة من الداخل متشابهة تماما وتتناقص فقط فى الحجم بحيث توضع كل فى الأخرى.

وهكذا نرى أنه فى وسط الشواش يوجد انتظام، وفى وسط الانتظام يوجد شواش.
لقد انتبه ماى إلى أن النتائج التى حصل عليها لها انعكاسات خارج مجالى علوم الحياة والاتزان البيئى - ونشر هذه النتائج فى مجلة (Nature) فى عام ١٩٧٦. كان هذا الوقت بالضبط تتوافق فيه الأبحاث فى مجالات العلم المختلفة وظهور نظرية الشواش. وهكذا تبلور مفهوم الشواش وأخذ هذا الاسم الذى نسميه به الآن. عندما اكتشف إدوارد لورنتس الشواش فى ستينيات القرن العشرين كان يعمل فى مجال تنبؤات الطقس (علم الأرصاد) وكان البحث المنشور تحت عنوان "Deterninistic Nonperiodic Flow" فى مجلة Journal of the Atmospheric Sciences فى عام ١٩٦٣م - هو نقطة الانطلاق لكل هذه الأعمال.

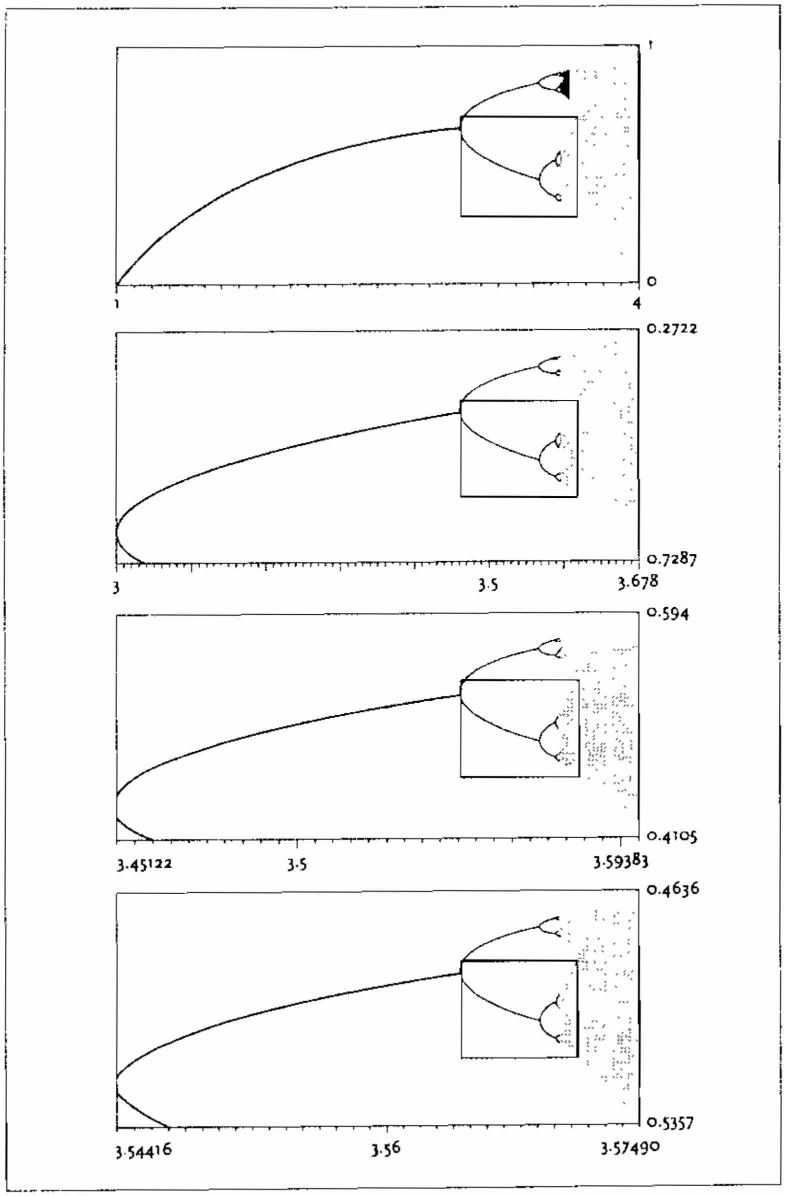


شكل (٣-١أ) أشكال فيجنباوم (Feigenbaum) والتى توضح تضاعف الدورة - الطريق إلى الشواش. تظهر الشرائح الرمادية المناطق الشواشية، والشرائح البيضاء تحوى مناطق استقرار - لاحظ أن كل هذا يمثل رسما تخطيطيا مبسطا جداً.

ولكن لا يقرأ الرياضياتيون ولا الفيزيائيون أو حتى البيولوجيون مجلات الأرصاد، والعكس صحيح. كان الكل يبحث عن الانتظام فى الشواش وليس كيف نحصل على الشواش من الانتظام.

بعد ذلك بعشر سنوات قام عالم الرياضيات جيمس يورك (المولود فى ١٩٤١م) والذى عمل فى معهد "Institute of Phyical Science and Technology" بجامعة ميريلاند "University of Maryland" - بمحاولة كسر الحواجز التى تفصل بين العلماء المشتغلين فى مجالات مختلفة، وقام أحد زملاء يورك وهو آلان فولر "Allan Fuller" فى قسم الأرصاد والذى قرأ عمل لورنتس بنسخ عدد من النسخ من بحث لورنتس ووزعها فى المعهد، واستوعب على الفور يورك أهمية التقنية الرياضية فى هذه المقالة، وأن هذا يمثل قاعدة لتطبيقات عديدة فى مجالات أخرى

من العلم وأساس لدراسة سلوك نظم فيزيائية حقيقية أخرى. لقد اعتاد علماء الرياضيات اللعب مع الأعداد وبنفس البرامج المشابهة لبرنامج لورنتس، ولكن لم يتنبه أحد قبل لورنتس للربط بين التمرين الرياضى والمسائل الفيزيائية الواقعية والحقيقية.

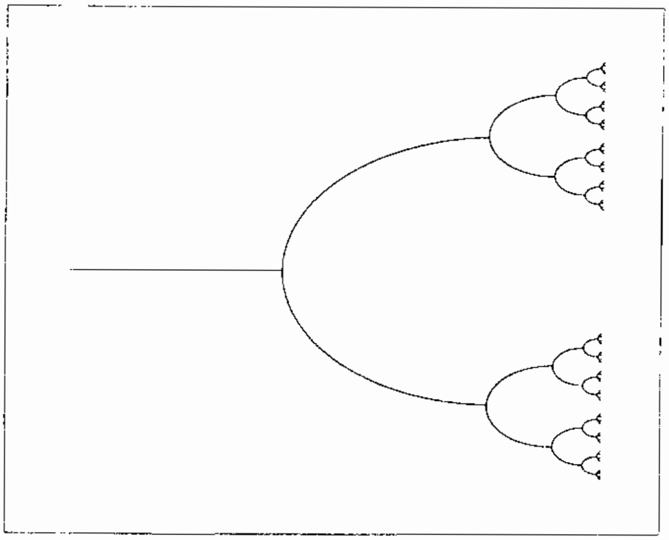


شكل (٣-١ب) السمة الأساسية لأشكال فيجنباوم أنها متشابهة. إذا تم تكبير أى جزء من الشكل بمقياس رسم مناسب، نحصل على شكل مناظر للشكل الأصلى.

كان يورك يعرف شخصا قام بهذا الربط. في زيارة لحرم بيركلى Berkely جامعة كاليفورنيا "University of California" – ترك نسخة لستيفن سميل (Stephen Smale) والذى يعمل بالتوبولوجيا وحاز على جائزة نتيجة عمله فى مجال النظم الديناميكية. قام سميل بدوره بعمل نسخ من المقالة المذكورة ووزعها على أساتذة الرياضيات، لقد انكشف السر ولكن لم يتم سك اسم له – حدث هذا فى عام ١٩٧٥م عندما قام يورك ورفيقه تين ين لى "Tien Yen Li" بنشر مقالة بعنوان «الدورة (3) تعنى الشواش» "Period Three Implies Chaos" – تكمن فحوى المقالة فى أنه إذا وجد حل لنظام من المعادلات التفاضلية وهو حل وحيد بزمن دورة (٣) فإنه يوجد بالضرورة عدد لا نهائى من الحلول الدورية بأى زمن دورة ممكن، بالإضافة إلى عدد لا نهائى من الحلول غير الدورية. ليس هذا بالشواش الذى نعنيه الآن، ولكن حسب وصف لورنتس نفسه «إن هذا شواش محدود» نظرا لوجود هذا العدد من الحلول اللاشواشية الدورية. على الأرجح سوف تكون هذه المنظومة دورية، ولكن فى الحالة التى أسماها لورنتس «شواشى كامل» – سوف تقع المنظومة فى حالة شواشية (انظر شكلى ٣-١أ ، ٣-١ب) – تفوق المناطق الرمادية الشرائح البيضاء. مع هذا تعتبر مقالة يورك – تين ين لى القول الفصل فى ترسيخ مفهوم الشواش كما نعرفه فى الوقت الحاضر.

وهكذا فى النصف الثانى من السبعينيات فى القرن العشرين ظهرت كلمة تصف ما توصل إليه ماى فى أبحاثه، رغم أن العلاقة التى توصل إليها لا تصف بدقة سلوك منظومة بيولوجية بسيطة لنوع واحد من الكائنات الحية. بعد سنوات قليلة من «اختراق» ماى – أوضح ميشيل فيجنباوم "Mitchell Feigenbaum" فى معمل لوسى ألاموس الوطنى فى نيومكسيكو "Los Alamos National Labara-tory in New Mexico" – أن عمل ماى ذو تأثير كبير فى مجالات أخرى من العلوم وأوضح فيجنباوم أن تضاعف الدورة المؤدى إلى الشواش ليس سمة مرتبطة بالمعادلة اللوجستية فقط، وإنما هى أوسع من ذلك بكثير هى فى الواقع نتيجة التغذية الخلفية للمنظومة،سواء كانت هذه المنظومة هى قطيع من الحيوانات، أو دائرة كهربائية أو تفاعل كيميائى متذبذب، أو حتى دورة اقتصادية فى اقتصاد ما، فالمهم أن تراجع المنظومة نفسها. إذا تحقق هذا يكون هذا هو الطريق للشواش – وليس «تقريبا» ولكن «بالضبط». تمعن فيجنباوم فى الفترة التى تمر بين كل تضعف لزمن الدورة ووجد أن هذه الفترات تقصر كلما ازدادت فيه B فى الطريق إلى الشواش حسبما وجد ماى، ووجد فيجنباوم أن هذه النسبة ثابتة وتساوى 4.699 : 1 بصرف النظر ما إذا كنا نقارن الخطوة الأولى بالثانية، أو الثانية بالثالثة، أو الخطوة المائة بالتى تليها. وهكذا تم تسمية العدد 4.699 باسم عدد فيجنباوم(*) .

(*) عدد فيجنباوم مثله مثل العدد π غير كسرى ويكتب كالآتى: ..4.669206090.



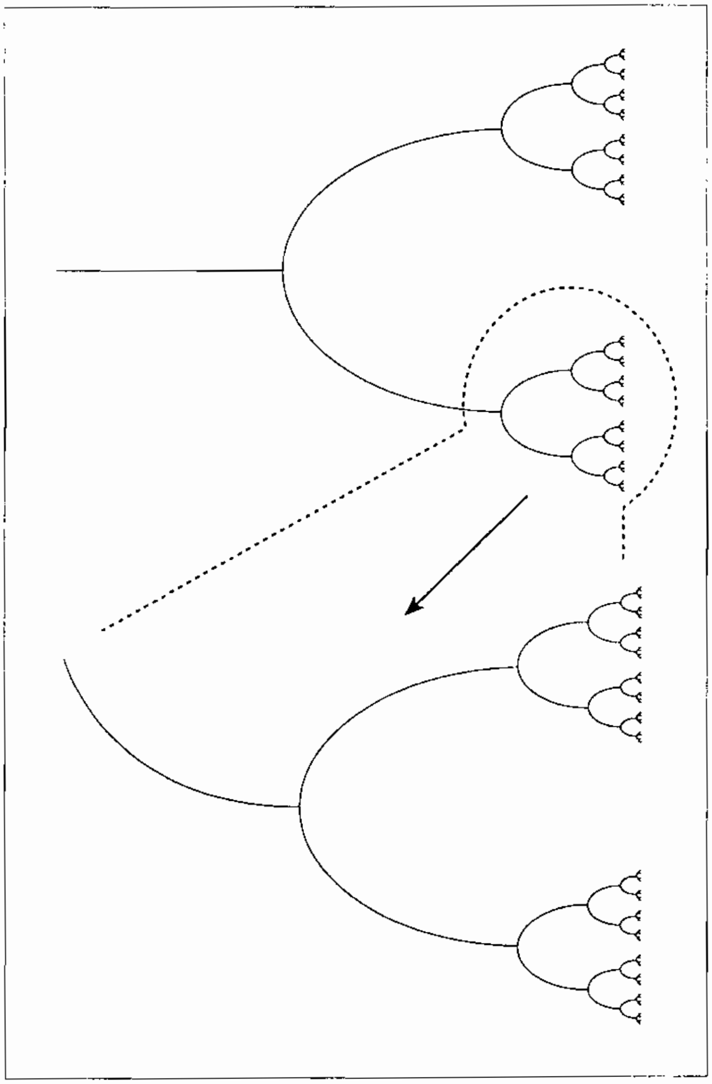
شكل (٣-٢أ) شكل مبسط للتشعب الوارد فى شكل فيجنباوم.

هناك .مثلة أخرى عديدة مفيدة توضح كيفية التحول من البساطة إلى الشواش. بالعودة إلى ظهور الانسياب الدوامى (turbulence) نجد أن التشعب يؤدى إلى ظهور عدد هائل من الدورات الدورية تضاف إحداها للأخرى (قام الفيزيائى الروسى ليف لانداو بإجراء هذا فى أربعينيات القرن العشرين). إن الدوامة البسيطة هى أنشوطة (Loop) حول جاذب بسيط (simple attractor) – أو الدورة الحدية (limit cycle) فى الخطوة التالية لنتصور نقطة فى الفراغ الطورى تدور على دائرة وبدوره يدور مركز هذه الدائرة على محيط دائرة، أكبر، فتكون النتيجة شكل طارة (torus) مثل الأنبوب الداخلى لعجلة الدراجة، أو طوق النجاة.

يكون المسار فى هذه الحالة مثل زنبرك أو كاللعبة المسماة (Slinky) طويت فى دائرة بشكل منتظم ومتوقع. من الناحية النمطية، إذا تفاعلت حركتان دوريتان فى الفراغ الطورى فإنهما ينغلقان داخل نظام ذى نبض متكرر. من الناحية الرياضية، يمكن وبشكل مباشر وصف السلوك التى يزداد تعقده فى الطريق إلى الاضطراب "turbulence" – عن طريق طارات (tori) ذوى أبعاد أعلى. إن الدورة الحدية هى جاذب ذو بعد واحد فى فراغ ذى بعدين، بحيث يكون سطح الطارة هو عبارة عن جاذب ذى بعدين فى فراغ طورى ذى ثلاثة أبعاد وهكذا.

ولكن الواقع لا يسلك مثل هذا السلوك – إن الاضطراب (turbulence) يحدث فى الخطوة التالية، حيث تتحول النقطة الممثلة لحالة النظام على سطح الطارة بشكل غير منتظم ولا تعود لأى وضع معين مرتين (لو فعلت ذلك أصبح النظام دوريا يكرر نفسه). بنفس الطريقة يكون سلوك مسألة «ثلاثة أجسام محدودة» التى ناقشناها سابقا. أسمى العالمان البلچيكى ديفيد رويل (David Ruelle) وزميله الهولندى

فلوريس تاكنس (Floris Takens) هذه الحالة بالجاذب الغريب (Strange Attractor) فى مقالة نشراها عام ١٩٧١م.

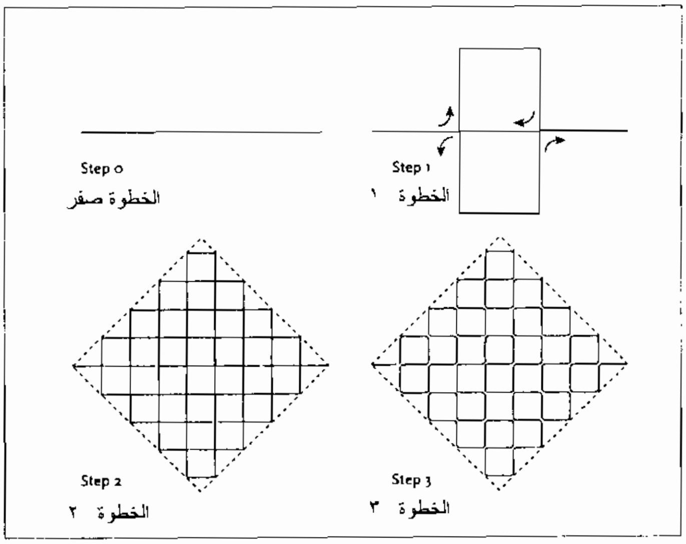


شكل (٣-٢ب) يوضح هذا الشكل فكرة التشابه الذاتى.

هنا بدأ إدخال مفهوم ما يسمى بالكسريات (Fractals) كما هو الحال بالنسبة للشواشى، وتلقت هذا الاسم فى عام ١٩٧٥م، وإن كانت تتردد فى العلم منذ مدة طويلة ودون الإحساس بقيمتها العالية.

إن ما نسميه الآن «بالكسريات» ظهرت لدهشة علماء الرياضيات أو حتى رعبهم قرب نهاية القرن التاسع عشر، فى ذلك الوقت كانت تعتبر انحرافات (Aberration) أو حتى أشكال وحشية مخيفة، حيث إنها لا تتوافق مع مجريات الأمور العادية فى الرياضيات.

فى عام ١٨٩٠م نشر عالم اسمه جوزيبى بيانو (Geuseppe Peano) بحثا عن كيفية رسم منحنى ليملأ صفحة كاملة، كما يبدو لغير علماء الرياضيات ليس فى ذلك شيء مخيف أو مرعب، إذا فكرت فى ذلك نجد أن أى منحنى ذى بعدين له طول وعرض ولكن المنحنى فى بعد واحد له طول ولكن ليس له عرض . بيّن بيانو أنه يمكن رسم مثل هذا المنحنى بحيث يتلوّى وينحنى دون أن يتقاطع مع نفسه، مع أنه يمر بكل نقاط المستوى. هكذا نرى أن منحنى أحادى البعد يملأ مستوى ثنائى البعد! كيف يكون هذا؟ لذا نقول بأن مستوى ثنائى البعد إذا كانت كل قطعة يمكن وضعها على منحنى أحادى البعد. أكثر من هذا ! إذا كان المستوى هو عبارة عن مربع فإن منحنى بيانو سوف يقتفى أثر مربعات أصغر مثل البلاطات، وداخل هذه المربعات الصغيرة سوف يقتفى أثر مربعات أصغر وهكذا... إن منحنى بيانو ذو طول لا نهائى ولكنه محتوى فى مربع مساحته محددة. هناك تناظر بين الاضطراب (turbulence) حيث تتجول نقطة على الطارة فى الفراغ الطورى إلى مالا نهاية - ولكن لم يكن كل ذلك معروفا فى التسعينيات من القرن التاسع عشر.

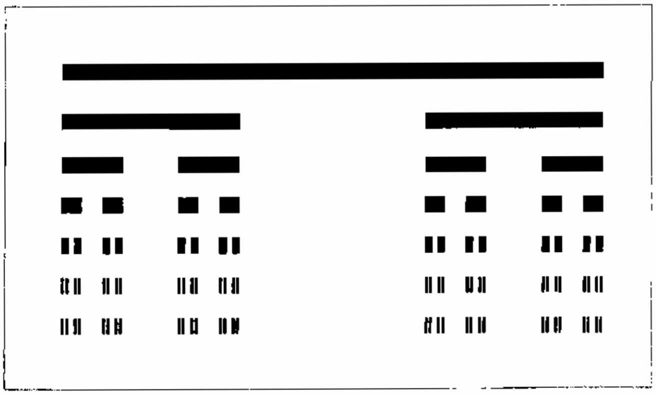


شكل (٣-٣) منحنى بيانو - خط يظن أنه مستوى، ينبغى أن ننظر إلى كل مربع فى الشكل على أنه ممتلئ، وكل مربع أصغر ممتلئ وهكذا إلى مالا نهاية.

فى السبعينيات من القرن العشرين قام بنوا ماندلبروت "Benoit Mandelbrot" الذى عمل فى شركة "IBM" فى مركز توماس ج. واتسون "Thomas J. Watson Research Center" فى يورك تاون هايتس (Yorktown Heights) لتطوير اللغة اللازمة لصياغة هذه الرؤى. ولد ماندلبروت فى وارسو ١٩٢٤م وكانت دراسته

فى الكهرباء، وهذا ما ساعده على أن يكون مؤسسا لفرع جديد من العلم. نزحت أسرته إلى فرنسا فى عام ١٩٣٦م حيث درس «بنوا» العلوم فى عام ١٩٤٤م. بعد تحرير فرنسا تنقل ماندلبروت بين أمريكا وفرنسا ثم استقر فى الولايات المتحدة فى عام ١٩٥٨م. توصل ماندلبروت إلى أن منحنى بيانو يمكن أن يحمل أُساً كسريا بين الواحد والاثنين. إن منحنى «بيانو» مازال منحنى فى بعد واحد، والمستوى مازال شكلا ذا بعدين، كان لابد من إدخال مفهوم الأس الكسرى مثلما يوجد عدد لانهائى من الأعداد اللاكسرية بين الأعداد الكسرية، يقول ماندلبروت «لقد سككت كلمة كسريات (Fractals) فى عام ١٩٧٥م من اللغة اللاتينية (fractus) والتى تعنى حجرا مكسورا وغير منتظم.

هناك ثلاث كسريات أخرى معروفة منذ عشرات السنين قبل ١٩٧٥م كان يُنظر لها على أنها أشياء متوحشة ولكنها جديرة بالدراسة. أول هذه الكسريات والتى كانت أول ما اكتُشفت هى «زمرة كانتور» والتى اكتشفها فى عام ١٨٨٣م. إن منحنى بيانو هو خط يريد أن يكون مستوى أما زمرة كانتور فهى خط أقل من خط. إذا أخذنا خطا ذا طول معين وقسمناه إلى ثلاثة أجزاء متساوية ومسحنا ثلث الخط الذى يقع فى المنتصف دون مسح النقطتين الداخلتين، حصلنا على خطين منفصلين - نكرر نفس الخطوة مع كل من الجزئين الباقيين وهكذا وهكذا. فى النهاية نحصل على زمرة من النقاط المنفصلة، كما يمثل «خيال الخط» كالابتسامة على وجه القطة فى قصة «أليس فى بلد العجائب»، من واضح الآن أن سمات زمرة كانتور متطابقة مع خواص الشواش حيث أن الأشكال متماثلة وبها تغذية خلفية.

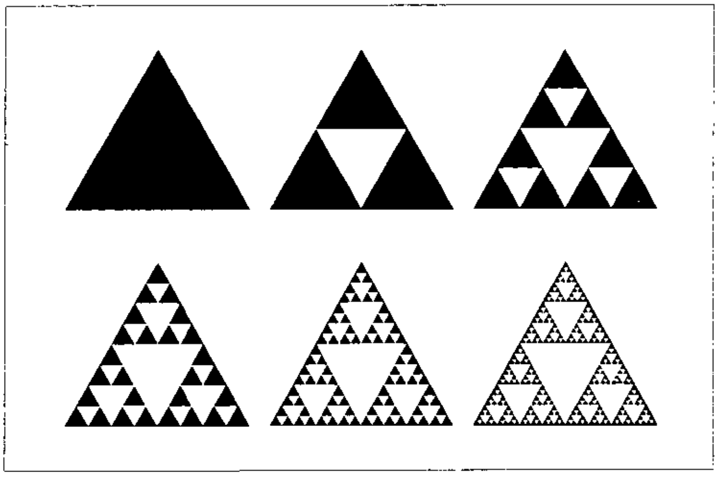


شكل (٣-٤) زمرة كانتور(*). عند مسح الثلث المتوسط من كل خط، تنتهى إلى غبار من النقاط مجموع أطوالها هو الصفر.

(*) لقد اكتشف عالم الرياضيات هنرى سميث (١٨٢٦ - ١٨٨٣م) هذه الزمرة فى عام ١٨٧٥م ولكن لم يكن كانتور على علم بذلك وهكذا تحمل هذه الزمرة اسم كانتور.

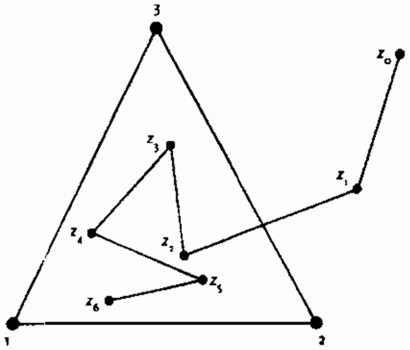
تكمن أهمية هذه الزمرة فى أنها كانت الدافع وراء عمل ماندلبروت الذى جلب له الشهرة. لقد كان ماندلبروت شخصا متعدد الاهتمامات من ترتيب الكلمات فى نص ما، إلى الظواهر التى تتغير مع الوقت والمكان وغيرها، ولكنه عندما أصبح يعمل كباحث فى شركة (IBM) ركز جهوده فى حل مشكلة حيوية خاصة بالضوضاء التى تحدث عند نقل المعلومات بين نظم الحاسبات فى وقت استخدام النظم النمذجية (Analog Systems) قبل التوصل إلى التقنيات الرقمية. كان يعترى المعلومات التى تنقل عبر الشبكات دفقات (bursts) من الضوضاء تشوه المعلومات عند نقلها. توصل ماندلبروت إلى حقيقة أنه إذا كان السبب فيزيائيا كسقوط فرع شجرة فوق الأسلاك تكون الضوضاء عشوائية حقا ولابد من إصلاح الخط برفع فرع الشجرة، أما إذا كانت الضوضاء متكررة وبشكل قريب من زمرة كانتور فلابد من إعادة إرسال المقاطع المشوهة لأن هذا من طبيعة نظام الاتصالات والشبكات ولا داعى لإضاعة الوقت والجهد والمال فى التخلص من هذه الضوضاء لأنها ملازمة للنظام ذاته. أثبت ماندلبروت أن الشواش والكسريات هما السبب فى كل هذا حتى قبل أن يتم سك هذين المسميين.

يمكن ملاحظة الصلة بين العمليات العشوائية، الشواش والكسريات فى شيء رياضى آخر «متوحش» من القرن العشرين - أشكال سيربينسكى - (Sierpinski Gaskets) وهو عالم رياضيات بولندى واسمه ڤاسلاف سيربينسكى (١٨٨٢ - ١٩٦٩م) وذلك فى عام ١٩١٦م. لرسم أشكال سيربينسكى لنأخذ مثلثا متساوى الأضلاع ونوصل نقاط منتصف كل ضلع وتوصل هذه النقاط، نحصل على مثلث أصغر، ثم نكرر هذا العمل مرات ومرات، نحصل على أشكال سيربينسكى. كما هو مبين فى شكل ٣-٥ .

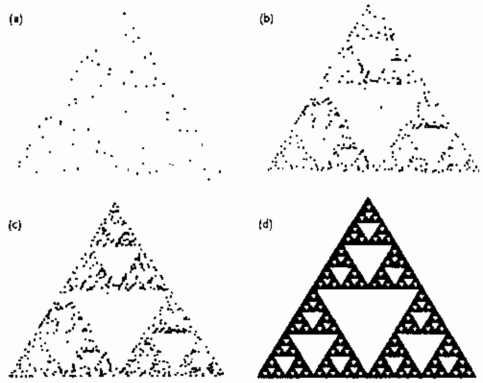


شكل ٣-٥) أشكال سيربينسكى.

نلاحظ أن أشكال سيربينسكى متماثلة ذاتيا وهى كسرية أيضا ببعد بين 1 و 2 . سوف نشرح حالا كيفية حساب الأس الكسرى.



(أ)



(ب)

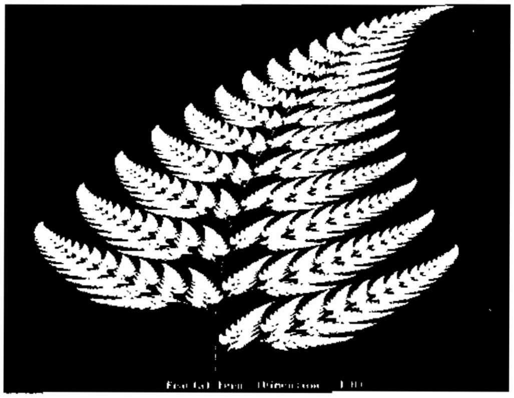
شكل (٣-٦) رسم أشكال سيربينسكى باستخدام زهر النرد.

حيث إن زهر النرد مكعب ذو ستة أوجه فإننا نخفض المتغيرات إلى ثلاثة بأن نعتبر الوجه الذى يحمل العدد ١ مكافئا للوجه الذى يحمل العدد ٤ ، و ٢ يكافئ ٥ ، و ٣ يكافئ ٦ . نأخذ ورقة ونرسم عليها مثلثا متساوى الأضلاع، ونرقم رءوسه بالأعداد ١ ، ٢ ، ٣ كما هو مبين فى شكل ٣ - ٦أ ، ونبدأ بأى نقطة على الورقة ونقيس المسافة بين هذه النقطة ورأس المثلث رقم (١) ثم ننصّف هذه المسافة ونحدد هذه النقطة، لتكن (أ)، ثم نقيس المسافة بين النقطة (أ) ورأس المثلث (٢) وننصفها ونحدد نقطة المنتصف بالنقطة (ب)، ونكرر هذه العملية مرات ومرات، سوف نحصل فى النهاية على شكل سيربينسكى كما هو مبين فى شكل ٣ - ٦ب

حيث إننا بدأنا من خارج شكل سيربينسكى فإننا نرى أن الشكل يمثل حاذبا لهذه العملية (جاذب غريب) بلغة رويل وتاكينز (Ruelle and Takens) . هذه اللعبة هى حالة بسيطة مما يسمى «بلعب العشوائية» والتى تعطى أشكالا بنفس القواعد البسيطة التى ذكرناها، ولكن هناك تحذيران: أولها: أن يلزم صبر فائق حتى نحصل على شكل مشابه لشكل سيربينسكى بعد مئات من الخطوات، التحذير الثانى: لا تستخدم الحاسب إلا إذا كنت مبرمجا محترفا حتى نطمئن لعشوائية الأعداد التى تستخدمها؛ لأن مولدات الأعداد العشوائية فى الحاسبات ليست عشوائية حقيقة.

جانب هام آخر وهو أنه عند إجراء تجارب عشوائية ورسم الأشكال الناتجة نحصل أحيانا على أشكال قريبة جدا من صور الكائنات الحية مثل السرخسيات والأشجار (شكل ٣-٧ معظم هذه الأمثلة يمكن الاطلاع عليها فى كتب: الشواش والكسريات "Chaos and Fractals" لمؤلفيه هاينز- أوتو بيتجن، هارتمرت يورجنز وديتمار ساوپى (Heinz-Otto Peitgen, Hartmut - Jurgens, and Diet-mar Saupe) . لا ندعى بهذا أن الكائنات الحية تنمو بهذه الطريقة، ولكن يمكن

أن نقول إن النظم التى تبدو معقدة يمكن الحصول عليها بواسطة تطبيق وبشكل متكرر لقواعد بسيطة، إن المعلومات المحفوظة فى الدنا (DNA) فى كل خلية رغم ضخامتها، من الصعب تصور أنها تحوى كل المعلومات والخطوات اللازمة لنمو هذا الكائن منذ أن يكون جنينا إلى أن يكون كائنا كاملا. ولكن يمكن تصور أن هذا الدنا يحوى مجموعة بسيطة من القواعد التى تنمو حسبها الخلايا، حتى تصل إلى كونها كائنا كاملا. يمكن أيضاً أن نقول إن قواعد أعقد قليلا من هذه يمكن أن تؤدى إلى أشكال معقدة مثل أشكال السرخسيات، ولكن لابد أن يكون لهذه القواعد جاذب نحو هذه الأشكال وبالتالى تتكون الأشكال المشابهة للسرخيات وهكذا. لذا يمكن أن نقول إن زهر النرد لا يمكن أن يكون مبرمجا لكى يعطى أشكال سيربنسكى . إنها العشوائية ثم قواعد بسيطة تستخدم بشكل تكرارى – هذه هى العوامل التى تشكل عالمنا المعقد كما نراه.

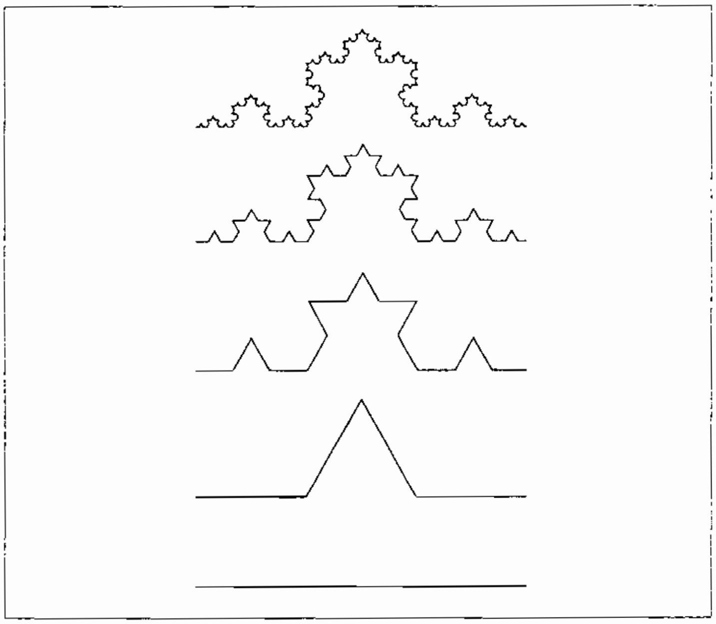


شكل (٣-٧) يمكن أن تعطى اللعبة العشوائية مع بعض التغييرات أشكالا شبيهة بأوراق السرخسيات.

هناك بعض الأمور المتعلقة بالكسريات والجاذبات وهى كيف يمكن قياس بعد الكسريات. يقودنا هذا إلى عرض أشكال أخرى متوحشة تسمى منحنى كوخ (Koch curve) – لقد ساعد هذا المنحنى أيضا ماندلبروت على دراسة الكسريات فى الستينيات من القرن العشرين. من الطريف أيضا أن نذكر أن كوخ قد قابل لويس فراى رتشاردسون. أهم سمة لمنحنى كوخ أنه لا يمكن رسم مماس له عند أى نقطة من نقطة؛ لأنه مكون وبشكل كامل من أركان (corners) .

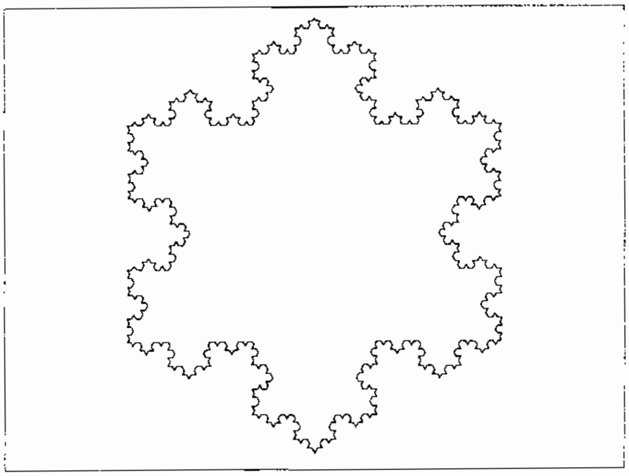
كوخ وهو عالم رياضيات سويدى واسمه هلجيه فون كوخ (Helge von Koch) (١٨٧٠ – ١٩٢٤م) توصل إلى هذا المنحنى الذى يحمل اسمه فى عام ١٩٠٤م . لنرى كيف يمكن رسم هذا المنحنى: لنبدأ بخط مستقيم، ونقسمه إلى ثلاثة أجزاء متساوية، لنرسم على الثلث المتوسط من الخط مثلثا متساوى الأضلاع،

بعدئذ نمسح الثلث المتوسط من الخط، ونكرر نفس الخطوة على كل أجزاء الخط وضلعى المثلث كما فى شكل ٣-٨ .



شكل (٣-٨) منحنى كوخ - إن شاطيء الجزر البريطانية أو النرويج يحمل السمات الكسرية مثل هذا المنحنى.

إذا أجرينا الخطوات السابقة على أضلاع مثلث متساوى الأضلاع، نحصل على نجمة داود كما فى شكل ٣-٩ ، أو كما فى نثرة الثلج لكوخ (Koch snowflake) .



شكل ٣-٩) منحنى كوخ على شكل نثرة ثلج.

ولكن إذا كررنا هذه الخطوات التكرارية نحصل على ما يسمى بجزيرة كوخ.

ولكن هل جزيرة كوخ هى جزيرة فعلا أم أن هذا مجرد تشابه؟ هذا السؤال هو الذى أثار ماندلبروت لكى يدرس الكسريات(*) . يضاف إلى ذلك أن ماندلبروت قرأ مقالة غير مشهورة لرتشاردسون عن استغرابه عندما قرأ كيف تم قياس طول الحدود بين أسبانيا والبرتغال، وبين بلچيكا وهولندا، فقد لاحظ رتشاردسون اختلاف طول هذه الحدود بمقدار ٢٠٪ عن القيمة الواردة فى المصادر المختلفة. عندما يقاس طول هذه الحدود بواسطة أجهزة المساحة المعتادة، حيث تستخدم نقاط على بعد ١٠٠م بين كل نقطة وأخرى. ولكن يمكن أن يكون هناك عوائق طبيعية، ولكن ليس هذا مهماً الآن. بهذه الطريقة يمكن أن نحصل على رقم ما لطول هذه الحدود. إذا استخدمنا طريقة أخرى كأن يتحرك شخص مستخدما عدد الخطوط مع التزامه بالسير مع المنحنيات وصعود التلال والهبوط فى الوديان - عندئذ نحصل على رقم أكبر لطول هذه الحدود، وهكذا كما نرى، فكلما استخدمنا وحدة أصغر فى قياس طول الحدود حتى نصل إلى مستوى الذرات، فسوف نحصل فى كل مرة على رقم أكبر لطول هذه الحدود نفسها.

لقد توسع ماندلبروت فى هذا الموضوع ونشر مقالة بعنوان «ما هو طول شاطئ بريطانيا» فى مجلة العلم (Science) فى عام ١٩٦٧م. ميزة هذه الحدود أنها طبيعية تماما لأن الحدود بين الدول صنعها الانسان وحاول أن تتكون من خطوط مستقيمة، مثل الحدود بين الولايات فى الولايات المتحدة الأمريكية. الخلاصة التى توصل إليها ماندلبروت أن طول شاطئ بريطانيا يؤول إلى مالا نهاية. خلُص ماندلبروت أيضا إلى أن المنحنى الممثل لشاطئ بريطانيا هو منحنى بعده كسرى يقع بين العددين ١ ، ٢.

لنستعرض الآن كيفية تحديد الأس الكسرى لمنحنى أو شكل هندسى ما: إذا قسمنا خطا مستقيما إلى ثلاثة أجزاء وأخذنا مقياس رسم مساويا للعدد ٣، وطبقناه على ثلث الخط سوف نحصل على خط مستقيم جديد مطابق للخط المستقيم الأصلى. نرى من هنا أن التصغير بمعامل ٣ ، ثم أخذ مقياس رسم أيضا (٣) - وهكذا نحصل على $(3 = 3^1)$. لنأخذ مربعا ونقسم كل ضلع إلى ثلاثة أجزاء فنحصل على تسعة مربعات أصغر، وهكذا لابد أن نأخذ تُسع المربع الأصلى ومقياس رسم مساويا للعدد (3) بالنسبة لكل ضلع حتى نحصل على الشكل الأصلى - وهكذا نرى أن $(9 = 3^2)$ أى أن المربع هو شكل هندسى بُعده (٢). إذا أخذنا

(*) كما ورد فى كتاب «الشواش» "Chaos" لمؤلفه جيمس جلايك "James Gleick" .

مكعباً وقسمنا كل ضلع إلى ثلاثة أجزاء متساوية نحصل على ٢٧ مكعبا صغيرا. وهكذا ترى أن المكعب شكلٌ بُعده 3 حيث أن $(27 = 3^3)$.

بالنسبة لمنحنى كوخ - فلابد أن نقسم الخط المستقيم إلى أربعة أجزاء ونستخدم مقياس رسم مساويا للعدد (3) ، إذن يكون بعد منحنى كوخ كالآتى:

من المعادلة البسيطة $(3n = 4)$ نجد أن قيمة $n = 1.2619$. وهكذا نرى أن منحنى كوخ هو شكل هندسى كسرى بُعده 1.2619 - نلاحظ أن القيمة 1.2619 توضح أنه أقرب إلى خط منه إلى سطح . مثلا أدت دراسة شاطئ بريطانيا إلى أنه شكل ذو بُعد يساوى 1.3(*) .

إن شهرة ماندلبروت أتت من اكتشافه للزمرة التى تحمل اسمه، والتى تنتج عن الحسابات التكرارية لتعبير رياضى بسيط، ولكنها تتميز بأنها تتعامل مع الأعداد المركبة، الأعداد المركبة هى تجريد رياضى يحتوى ما يسمى بجذر العدد السالب (-١)، السمة الأساسية لهذه الأعداد أنها بالضرورة ثنائية الأبعاد. إن العدد المركب هو الحد الأدنى المطلوب لمعرفة وضع نقطة على مستوى، حيث إنه يحمل بعد النقطة عن كل من حدى المستوى (المحور x والمحور y). نحصل على زمرة ماندلبروت إذا أجرينا حسابات تكرارية مع التعبير الرياضى $(Z^2 + c)$ حيث Z - عدد مركب متغير، C - عدد مركب ثابت. عند إجراء هذه الحسابات التكرارية نحصل على نتائج، وعندما نرسم ما يسمى بالمستوى المركب نحصل على أشكال شديدة التعقيد، ربما أعقد أشكال قام الإنسان بدراستها، وهى ليست معقدة فقط، بل وجميلة جدا أيضا، لدرجة أنها أصبحت أيقونة فى الكثير من المعلقات (Posters) ذات الأحجام الكبيرة، ولكن كل ما يهمنا الآن هو أن هذه الأشكال المعقدة جدا نحصل عليها بقواعد بسيطة جدا.

السؤال المحورى الآن: كيف ينتج هذا التعقيد من هذه البساطة؟ هذا هو الرابط بين الشواش والكسريات، هنا نعود لصديقتنا القديمة « المعادلة اللوجستية» ونعبر عن تأثيراتها بلغة التوبولوجيا، مما يؤدى إلى المزيد من التعقيد والذى نوهنا عنها سابقا.

إن ما تفعله هذه المعادلة اللوجستية والحسابات التكرارية هو إسقاط زمرة من الأعداد على زمرة أخرى من الأعداد أيضا. إذا كانت هناك نقاط على سطح مستوٍ، أو على سطح كرة على أى سطح آخر، يمكن أن نغيرها نقطة بنقطة بنقاط أخرى فى مكان آخر على المستوى، رغم أننا معتادون على هذه العملية فإننا لانتفكر فيما

(*) هناك طرق مختلفة لحساب بُعد الأشكال الكسرية تؤدى إلى نتائج متقاربة وليست متطابقة ولكن هذا لا يدخل فى موضوعنا الأساسى.

يحدث بالفعل. هذه العملية تسمى «إسقاطا» أو رسم الخرائط (Mapping) . إن خريطة مدينة توضح الطرق والشوارع والمبانى فى مدينة ما بشكل مصغر وبمقياس رسم بحيث يمكن رسمها على قطعة من الورق، ولكن الخريطة لاتعكس ولا يمكن أن تعكس كل تفاصيل المدينة التى تمثلها، أكثر من ذلك، يمكن أن تحوى الخريطة بعض التشوهات ولكنها تظل مفيدة. إن خريطة المترو فى مدينة لندن توضح كل المحطات وخطوط القطارات ولكنها ترسم بشكل يوضحها بصورة مبسطة.

فى هذه الحالة مقدار التشوه اختيارى، أما رسم خريطة للكرة الأرضية على مستوى لابد وبالضرورة أن تحوى تشوهات؛ لذلك تبدو أشكال القارات فى الطريقتين الميركا تورى (Mercator) وطريقة بيترز (Peters) مختلفة، وكلا الشكلين يختلفان عن الأشكال الحقيقية للقارات على الكرة الأرضية.

إن العملية التى تصفها المعادلة اللوجستية هى فى الواقع إسقاط، حيث نرى أن هذه المعادلة تؤثر على زمرة من الأعداد التى تمثل خطا مستقيما. إن هذه المعادلة اللوجستية تحول قيم x إلى قيم حسب العلاقة:

$$x\ (next) = B\ x\ (1 - x)$$

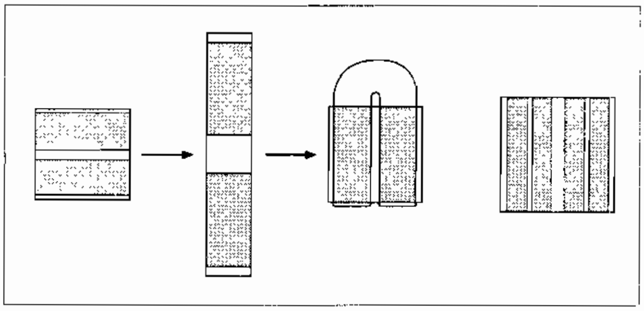
ونظرا لعملية الاستواء (renormalization) سوف تأخذ x قيما بين الصفر والواحد. للتبسيط سوف نأخذ B = 3 . لنأخذ ماذا يحدث مع قيم x مع فاصل قدره 0.1 ، النقطة X = 0 سوف تقع على النقطة صفر. عند x = 0.1 نحصل على x (next) = 0.27 ، النقطة x = 0.2 تقع على النقطة x (next) = 0.63 ، النقطة 0.3 تقع على النقطة x (next) = 0.63 ، النقطة x = 0.4 على النقطة 0.72 ، النقطة x = 0.5 على النقطة 0.75 . نرى من هذا أن المسافة من الصفر وحتى 0.5 قد تمدد ليشمل خطا من الصفر حتى 0.75 . يوضح هذا خاصية أساسية لمفهوم اللانهاية، فهناك عدد لا نهائى من النقاط فى الخط المستقيم، هناك ارتباط (corrlation) ١ : ١ بين النقاط الواقعة على المستقيمين، رغم أن طول أحدهما يبلغ نصف طول الآخر.

فى النصف الآخر من المستقيم يحدث شيء عكسى، النقطة x = 0.6 تقع على النقطة 0.72، النقطة x = 0.7 تقع على النقطة 0.63 ، والنقة 0.8 تقع على النقطة 0.48 ، و 0.9 تقع على 0.27 . وحيث إنه بالنسبة للنقطة x = 1 نحصل على x (next) = 3 (1 - 1) = 0 أى تقع على نقطة الصفر مرة أخرى. إذن النصف الثانى من المستقيم لم يتمدد فقط وإنما انطبق على النصف الأول لهذا الخط المستقيم. لقد حدث تحويل (transformation) توبولوجى للخط المستقيم مكون من تمدد وطيٍّ. والآن رغم أن الخط زاد طوله بمقدار النصف إلا أنه أصبح منطبقا على

ثلاث أرباع طوله الأصلى. إن العلاقة بين الجبر والتوبولوجيا هامة وعميقة. حين نرى أن علاقة بسيطة مثل $y = x^2$ يمكن أن تمثل بخط على الورقة أو مسار فى الفراغ على شكل قطع مكافئ. ولكن ما يهمنا هو الفراغ الطورى وليس الفراغ الحقيقى.

إذا نظرنا إلى الأمور من خلال المفردات الفيزيائية وليس المفردات الرياضية التجريدية فإن عملية التمدد والطى التى تنتج عن المعادلة اللوجستية تؤدى إلى شكل حدوة حصان إذا طبقت على شكل أسطوانى، ويسمى هذا التحويل بتحويل حدوة الحصان، كما فى شكل ٣ - ١٠.

ولكن لماذا نتوقف عند تحويل حدوة الحصان فقط؟ إن التكرارية تمكننا من الحصول على بنيات معقدة من قواعد بسيطة.



شكل (٣-١٠) حدوة الحصان لسمايل (Smale's horseshoe) **الناتجة عن تحويل الخبّاز** (Baker transformation) **. إن تكرار عملية الطى والتمدد يؤدى إلى وجود بنية متعددة الطبقات، بحث تكون الطبقات مرتبة بشكل يماثل النقاط فى زمرة كانتور.**

وهكذا يمكننا تحويل حدوة الحصان مرة أخرى، ثم نحول حدوة الحصان المحوّلة مرة أخرى وهكذا وهكذا، هذا شبيه بما يفعله الخباز يفرد العجين ثم يطويها ثم يفردها ويطويها مرات ومرات، لذا يسمى هذا التحويل بتحويل الخباز، لقد قام ستيفن سمايل بوضع الرياضيات اللازمة لوصف هذه التحويلات ثم تنبه إلى الشواش من خلال احتكاكه بروبرت يورك.

لنتصور أن الخط الأصلى هو جاذب فى الفراغ الطورى، ولنتصور ماذا يحدث له عند إجراء تحويل حدوة الحصان.

عند كل خطوة يتمدد طول الخط ولكنه عند طيه يشغل حيزا أقل فى الفراغ. فى الخطوة هذه يكون عندنا خطان أحدهما فوق الآخر وأنثناء واحد، وفى الخطوة التالية يكون هناك أربع خطوات (وثلاثة انثناءات)، أما فى الخطوة التالية فثمانية خطوط وسبعة انثناءات وهكذا... نرى أن عدد الطبقات يتضاعف وعدد الانثناءات

يساوى عدد الانثناءات السابقة مضاعفة ويضاف إليها الواحد. بهذا ننتهى إلى منحنى ملتوٍ بشدة، يحوى عددا لا نهائيا من الطبقات ولكنه لا يشغل أية مسافة، سواء أفقيا أو رأسيا. إذا أخذنا مقطعا عرضيا فى هذا المنحنى سنجد نقاطا موزعة بالضبط مثل نقاط زمرة كانتور، ولكن من أين أتت النقاط التى تقع أمام بعضها البعض؟ نظراً للعمليات المتكررة من التمدد والطى فإن أى نقطتين نهائيتين بدأتا قريبتين إحداهن من الأخرى على الخط الأصلى، يمكن أن ينتهيا بعيدتين إحداهن عن الأخرى، ويمكن أن تنتهى نقطتان كانتا على طرف الخط الأصلى تصبحان قريبتين جدا إحداهن من الأخرى. إذا كانت حالة النظام تمر على الخط الأصلى بشكل تدريجى فــى اتجاه معين، فإنها سوف تبدو وكأنها تقفز فى زمرة كانتور بشكل عشوائى. هذه هــى التوبولوجيا المرتبطة بظهور الشواش الناتــج عــن تضاعف الدورة (period doubling) .

هذا الشكل المكون من عدد لا نهائى من الطبقات مثل الفطيرة متعددة الطبقات، ويحدث هذا أيضا فى جاذب لورنتس.

كما هو مبين فى شكل ٢-٣ فإن المنحنى المبين لجاذب لورنتس فى الفراغ الطورى يبدو أنه يتقاطع مع نفسه مرات عديدة – فى الواقع عددا لا نهائيا من المرات. لكن ما يحدث حقيقة هو أنه مع كل تقاطع «ينتقل» الجاذب إلى طبقة أخرى من الفراغ الطورى، أى ينتقل إلى مستوى آخر. يمكن أن نمثل ذلك لزيادة الإيضاح أن نتصور كتابا مكونا من أوراق سمكها متناهى الصغر والكتاب مفتوح من المنتصف، أحد فصى جاذب لورنتس يرسم فى الصفحة اليمنى والفص الآخر فى الصفحة اليسرى، وهناك فص أو سلسلة من الفصوص تتواجد فى كل صفحة، ففى كل مرة عندما ينتقل المسار ويمر عبر منتصف الكتاب فإنه ينتقل إلى الجانب الآخر وبالتالى ينتقل إلى صفحة مختلفة من الكتاب. إذن هناك عدد لا نهائى من نقاط التقاطع، ولكن المنحنى الذى يمثل الجاذب لا يتقاطع أبدا مع نفسه.

فى كلتا الحالتين – جاذب حدوة الحصان وجاذب لورنتس – يتواجد عدد لا نهائى من الطبقات من الفراغ الطورى فى حجم محدود من الفراغ الطورى نفسه. كلا الجاذبين كسرى البعد، كلاهما جاذبان غريبان . هذه هى فقط البداية. إذا أجريتا عمليات تمدد وطى مع جاذبات ليست فى البداية خطا مستقيما فى الفراغ الطورى (مثل الجاذب الذى يتجول على سطح طارة فى الفراغ الطورى)، ننتهى إلى أشكال متناهية التعقيد من الشواش الكسرى، ولكنه ما يزال مبنيا على زمرة من القواعد بسيطة.

أخيرا نملك كل المعلومات التى نحتاجها لكى نرى بأن البساطة الموضوعة فى

هذا العالم يمكن أن تؤدى إلى بنيات معقدة، وبذا يمكننا أن نبدأ فى التحرك بالتدريج على هذه الطبقات من التعقد إلى أن نصل إلى كيفية ظهور الحياة نفسها.

لنتذكر الطريقة التى حسبنا بها البعد الكسرى لمنحنى كوخ من خلال الأس الذى يظهر فى قانون مقياس الرسم. من كل هذا توصلنا إلى أن المكعب ذو ثلاثة أبعاد .. والكرة أيضا جسم ثلاثى الأبعاد.. فى منتصف ثمانينيات القرن الماضى وجد العلماء الذين يدرسون معدل التمثيل الغذائى للحيوانات ذات الأحجام المختلفة أنها تخضع لقانون أسى ولكن الأس لا يساوى الثلاثة . لقد قام هؤلاء العلماء بقياس معدلات التمثيل الغذائى للفئران، الكلاب، البشر والخيل. إن كتلة الحيوان تتناسب مع حجمه، وكان المتوقع أن يزداد معدل التمثيل الغذائى مع ازدياد الحجم أو الكتلة لكن لدهشة العلماء ازداد معدل التمثيل الغذائى بقانون أسى ولكن الأس لا يساوى الثلاثة، وإنما 2.25، أى أن معدل التمثيل الغذائى يتغير وكأن أجسام الحيوانات ليست أشكالا ثلاثية الأبعاد، وإنما ذات بعد يقع بين الاثنين والثلاثة – أى شكل كسرى – وهذا يعنى بالنسبة لعالم الرياضيات أن جسم الحيوان هو عبارة عن أسطح كسرية مطوية فى حجم محدود هو جسم الحيوان.

إذا أمعنّا النظر إلى الأجسام بتفصيل أكبر، نجد أن العديد من سمات النظم الحية هى نظم كسرية. إن طريقة تشعب الشرايين والأوردة لابد وأن تكون بالضرورة كسرية حتى يمكن للدم أن يذهب إلى ويعود من أجزاء الجسم المختلفة دون أن تشغل هذه الأوردة والشرايين حيزا كبيرا من الجسم فلا يتبقى حيز لشىء آخر. واضح جدا كل هذا فى الكلى على سبيل المثال، حيث تتفرغ وتتشعب الشرايين والأوردة حتى يحدث تبادل كامل للسوائل. إن الكُلى حيز محدود جدا، وهى شكل ثلاثى الأبعاد، ولكن الشرايين والأوردة بها تُحوِّل إلى طول لا نهائى من شكل كسرى حقيقى.

بالطبع ينهار التماثل فى الحالات المتطرفة – إن النظم بداخل الكلى لا تتفرع إلى مالا نهاية ، وإنما تتفرع عدة مرات، عدة مرات فقط – وإذا تحركنا فى الاتجاه المضاد فإن الكلى ليست محتواة فى «كلى فائقة» (super kidneys) وهكذا إلى الأبد – ولكن نجد أن كل نظام محتوى فى نفسه. ومع ذلك فإن التماثل بين العديد من النظم الحية والكسريات أكبر من أن يكون مجرد تماثل، فكل هذا يوضح كيف أن سطح الرئة، وهو سطح ثنائى الأبعاد له مساحة كبيرة بدرجة تكفى لتبادل الأكسجين وثانى أكسيد الكربون بكمية كافية لحفظ الكائن حيا – رغم أنها محصورة فى حيز صغيرة محدود. إن سمات شبه – الكسرية والتشابه الذاتى سمات منتشرة فى كل أجسام النظم الحية. لنتذكر أن مقدار الحامض النووى (DNA)

المطلوبة لحفظ شفرة تكوُّن هذه النظم هو فى الواقع بسيط، مقارنة بالكم اللازم اختزانه فى البصمة الوراثية الكاملة لتكون جهاز فرعى مثل الكلى. إن القواعد البسيطة التى تقف خلف تكون الكسريات التى تسمح للأشياء الحية ذات البنيان المعقدة بدرجة كافية لكى تكون قادرة على طرح أسئلة عن طبيعة العالم حولها حتى تتطور.

ما رأيناه فى كل ذلك أنك يمكن أن تجد فى نظم غير ذات معنى بالمرة مثل نقاط مياه تتساقط من صنبور بزمن دورة يساوى الوحدة. ويمكنك أيضا أن تجد نظما شواشية بها اضطرابات عشوائية، أى لا يوجد بها أى انتظام، والبنية كلها مدمرة. ولكن يوجد بين هذا وذاك بدءاً بالبداية المملة، يزداد التعقد بالتدريج حتى يحدث الشواش؛ لذا فإن الأمور ذات المعنى فى الكون تحدث عند نهاية الشواش - تحديدا قبيل انهيار الانتظام ، هنا نجد الصنابير (أو الشقوق التى تسرب ماء من خلالها) تسيل منها القطرات بمعدل غريب وساحر، «دوّامات داخل دوّامات تدور مكونةً أشكالا رائعة، والتعقد غير العادى للكلى ، أو سطح تلافيف المخ المطوية طبقات فوق طبقات وهكذا.

حتى الآن استعرضنا الانتظام والشواش والآن نبدأ فى النظر إلى نهاية الشواش حيث يحيا التعقد.

الباب الرابع

من الشواش إلى التعقيد

تتظاهر الديناميكا الحرارية الكلاسيكية بأنه لا وجود للزمن، حيث يتم وصف هذه النظم الشرموديناميكية من خلال تغيرات ضئيلة تستغرق وقتا طويلا جدا لكى تنتقل من حالة إلى أخرى. كذلك تفترض الديناميكا الحرارية عدم تبادل الطاقة - وبالتحديد الحرارة عبر النظام كله. ولكن كما رأينا فإنه فى مثال بسيط يتم فصل الأيدروجين عن كبريتيد الأيدروجين نظرا لوجود الانتشار الحرارى (Thermal dif-fusion) وتحدث أشياء هامة عند انسياب الطاقة إلى النظام الشرموديناميكى . هناك قدر هائل من الطاقة يتولد فى الجسم عن طريق التمثيل الغذائى للطعام، تغذى هذه الطاقة العضلات والأنشطة الأخرى فى الجسم، وتتحول كل هذه الطاقة إلى حرارة فى نهاية المطاف. إن تشتت الطاقة سمة أساسية فى الديناميكية الحرارية اللاانعكاسية. يميز انسياب الحرارة وتشتتها هذه النظم من النظم المغلقة التى جرى عنها الحديث سابقا. نخلص من هذا أنه فى النظم المغلقة فقط يمكن الحديث عن انعكاسية الزمن وانعكاسية الأحداث التى تكلم عنها بوانكارية. فى النظم المفتوحة - لابد أن نأخذ اللانعكاسية فى الاعتبار، ويظهر سهم الزمن.

كما رأينا فى الباب الثانى تنبنى الديناميكا الحرارية الكلاسيكية على تناقضات. إن تعبير «الديناميكا» نفسه يعبر عن أن النظم تتغير، ولكن فى نفس الوقت يتم حساب الأنتروبية فى النظم المستقرة، حيث لا يتغير شيء. إن الاستقرار نفسه غير ذى معنى فى هذا السياق؛ لأنه يعنى أنه لا يتغير أى شيء. إن أى نظام حى يصل إلى حالة الاستقرار فقط عندما يموت.

ولكن مازال من المفيد أن ندرس النظم الشرموديناميكية قرب حالة الاستقرار حيث تكون التأثيرات ضئيلة، ورد فعل النظم خطيا . لقد وضع العالم النرويجى لارس أونزاجر (Lars Onsager) أساسيات الديناميكا الحرارية اللاإنعكاسية. يكمن جوهر عمل أونزاجر فى التوصل إلى ما يسمى بالعلاقات التبادلية (reciprocating relations) والتى تشير إلى وجود تماثل فى هذه النظم. فمثلا فى الانتشار الحرارى عند ظهور فارق فى درجات الحرارة ينشأ فارق فى التركيز، والعكس بالعكس. أصبحت هذه العلاقات تعرف بالقانون الرابع للديناميكا الحرارية.

قام إليا بريجوجين (Ilya Prigogine) بعد ذلك بتطبيق هذه العلاقات فى تطبيقات مختلفة، لقد بيّنّا فى الباب الأول أن مثل هذه النظم تستقر ليس إلى حالة

الموت عند القيمة القصوى للأنثروبية وإنما إلى حالة تتولد فيها الإنتروبية بأقل معدل ممكن.

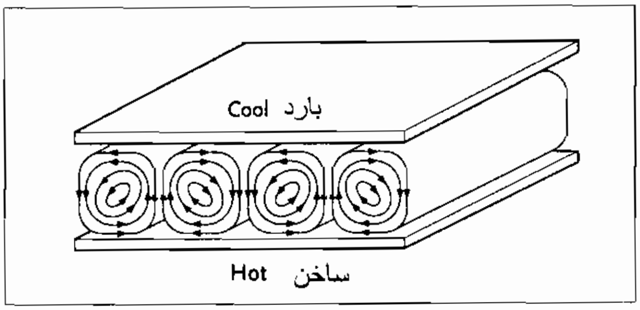
حتى الإنسان يحافظ على كيانه لسنين طويلة طالما يتزود بالطاقة اللازمة (الغذاء) إلى أن يحدث انهيار لسبب غير مفهوم حتى الآن. ولكن حياة الإنسان البالغ تختلف جذريا عن التغيرات الدرامية التى تحدث عندما ينمو الجنين من خلية واحدة حتى يكتمل – فى عملية من البديهى أنها لاخطية.

الأكثر من ذلك أن أعمال بريجوجين ورفقائه فى ما يسمى «بمدرسة بروكسل» كانت تتركز حول وضع الرياضيات الخاصة بالنظم الثرموديناميكية بعيدا عن وضع الاستقرار، حيث تؤدى التغيرات الطفيفة فى الوسط المحيط إلى تغيرات كبيرة فى النظام نفسه. دون الدخول فى تفاصيل، يلزم الإشارة إلى أن مثل هذه النظم توصف بمعادلات غير خطية وتحوى تغذية خلفية.

بالإضافة إلى ذلك انشغل بريجوجين بمحاولة كشف الغموض الذى يحيط بالزمن وطبيعته والعلاقة بين الديناميكا الحرارية وسهم الزمن، بل وكان اهتمامه منصبا على مسألة كيف يمكن أن ينتج الانتظام من الشواش – ليس الشواش اليقينى (deterministic) وإنما ما كان قدماء اليونان يعنون بالشواش – أى توزع الغازات التدريجى فى الكون عندما كان شابا – قرب النقطة التى توضح كيف نشأنا نحن من حالة الفوضى العارمة التى تلت ما يسمى بالانفجار العظيم (Big Bang) .

من أفضل الطرق لشرح ماهية هذه الظواهر اللاخطية اللجوء إلى العمل الذى أنجزه العالم الفرنسى هنرى بينارد (Henry Benard) فى عام ١٩٠٠م. وحيث أن العالم الإنجليزى لورد رالى (Lord Rayleigh) قد درس أيضا هذه المسألة فإنها تعرف بعدم استقرار رالى – بينارد ، ولكى نرى ذلك، لنأخذ إناء ونضع به طبقة رقيقة من زيت السيليكون ونسخنه من أسفل بموقد المطبخ المعتاد (لابد ألا يزيد سمك طبقة الزيت عن مليمتر واحد، والتسخين لابد أن يكون متجانسا، لكى تصبح الرؤية أفضل) يمكن أن ننثر فى الزيت قليلا من مسحوق الألومنيوم. إذا لم يكن التسخين متجانسا فسوف تظهر تيارات حمل فى بعض المناطق ويختلط الزيت ولا نحصل على شىء جديد ذى أهمية. المهم هنا هو تأكيد تجانس التسخين فتكون كل الطبقة السفلى ساخنة والعليا باردة عند فارق حرج فى درجات الحرارة تحاول كل الطبقة السفلى الصعود إلى أعلى فتتكون خلايا منتظمة تتحرك فيها تيارات السائل إلى أعلى وأخرى إلى أسفل، كما هو مبين فى شكل (٤-١): هنا لا يمكن الحكم مسبقا على أى جزء من السائل هل سيكون فى الخلية التى يدور فيها السائل مع أو ضد عقارب الساعة. لقد حدث تشعب ثنائى – أى شواش – وإن كان رالى نفسه لم يكن يعلم

ما هو الشواش. إذا ازداد فارق درجات الحرارة،ينقسم السائل إلى ضعف العدد من الخلايا، وهكذا نرى تضاعف الدورة. وإذا زاد فارق درجات الحرارة (أو ما يسمى بعدد رالى) تزداد الأمور تعقيدا، وتظهر هذه الخلايا وتختفى وتعود للتكون وهكذا . إذا أضيف دور التوتر السطحى نلاحظ تكون أشكال سداسية على سطح الزيت، أى خلايا تيارات حمل تعطى شكلا مثل قرص شمع العسل.



شكل (٤-١) فى تيارات حمل بينارد تتكون خلايا ذات مقطع عرضى على شكل مستطيل.

هكذا نرى أن انسياب الطاقة هو سر حدوث الانتظام فى الكون، وبالتالى هو سر الحياة ذاتها «إذا ازداد تعجبك من تعقد الحياة وتنوعها، فتذكر تيارات حمل برنارد على شكل الخلايا السداسية مثل قرص شمع العسل «إنها نفس الشيء».

حتى يمكننا الحفاظ على حالة خاصة لنظام ما بعيدا عن الاستقرار، لابد للنظام أن يكون مشتتا للطاقة (dissipative) ، منفتحا على الوسط المحيط، ولابد من وجود مصدر خارجى للطاقة. بالنسبة للأرض تأتى هذه الطاقة من الشمس. إن سطوع الشمس يجعل من الواضح كيف ظهر الانتظام من الشواش وكيف ظهر سهم الزمن فى كوننا هذا.

كل هذا بسبب الجاذبية. إن طاقة الجاذبية طاقة متفردة – ترتبط بكتلة الجسم وتحمل إشارة سالبة، لأول وهلة يبدو هذا غريبا، ولكن لننظر لهذه المسألة على مرحلتين: أولا تناقص قوة الجذب بين جسمين، حسب قانون التربيع العكسى، وهكذا كلما بعُد الجسمان، نحتاج لقوة أقل لكى نبعدَهما مسافة أكبر وهكذا – لذلك يلزم صاروخ كبير جدا لكى يضع قمرا صناعيا فى مداره حول الأرض، ولكن عندما يستقر هناك، نحتاج لصواريخ صغيرة جدا لندفع بهذا القمر إلى القمر الطبيعى أو المريخ.

كان العالم روسى المولد چورج جاموف (George Gamov) إبان الحرب العالمية الثانية يعمل فى الأسطول الأمريكى فى واشنطن ويذهب مرة كل أسبوعين

إلى أينشتين فى برنستون ليطلعه على ملف به براءات اختراع لعله يختار منها ما يفيد فى الحرب الدائرة . كان جاموف أول من وضع أسس نظرية الانفجار العظيم (Big Bang Theory) . فى إحدى الزيارات تحدث جاموف مع أينشتين بشأن العالم باسكوال چوردان (Pascual Jordan) والذى طرح فكرة جريئة بأنه إذا تصورنا أن كتلة جسم تتركز فى نقطة بداخله فإن هذه الطاقة لابد وأن تساوى ($-mc^2$) حيث m – كتلة الجسم c – سرعة الضوء، أى أنه يمكن أن نحصل على جسم (حتى وإن كان نجما) من لا شيء – نعم من لا شيء .

هذا يعنى أنه بالنسبة للكون الذى نعيش فيه يمكن أيضا أن نقول إن الطاقة الكلية للكون مساوية للصفر – ثم بدأ الانفجار العظيم والتمدد ....

يحدث التمدد وكما تصفه النظرية النسبية العامة وأن التمدد ناتج عن تمدد الكون وليس عن حركة المجرات التى نعيش فى إحداها – وهى درب التبانة – وهناك البلايين من المجرات الأخرى.. بناء على معدل التمدد الحادث يمكن حساب عمر الكون، وقد وُجد أنه تقريبا ١٤ بليون سنة. مما نراه وحيث أن الضوء ينتشر بسرعة ثابتة نجد أنه عندما نرصد نجما ليبعد عنا بعشرة ملايين سنة ضوئية فإن ما نرصده يدلنا على ما حدث منذ عشرة ملايين سنة. من هذه المشاهدات نجد أن الكون منذ ٤٠٠,٠٠٠ سنة كائن يتكون من سحابة متجانسة من الغاز الساخن المتأين المسمى بالبلازما بدرجة حرارة حوالى ٦٠٠٠° م مثل درجة حرارة سطح الشمس الآن.

بردت بالتدريج كرة النار (مثلما يبرد الغاز الساخن عندما يتمدد الصندوق الذى يحويه) وتكثفت بعض أجزائه، وتكونت على شكل أقراص ضخمة متمدد وازداد عدم الانتظام فى الكون ووصلت درجة حرارة الفراغ بين المجرات إلى – ٢٧٠°م (أى قرب ما يسمى بالصفر المطلق) والشاهد على ذلك صور الإشعاع الكهرومغناطيسى الذى يرصده علماء الفلك الكونى من الاتجاهات المختلفة الذى يصل إلينا من الأبعاد السحيقة فى هذا الكون.

على خلاف ما نراه عندما نضع غازا فى صندوق، فنهتم فقط بما يحدث من تصادمات بين جزيئات الغاز مهملين تماما دور قوى الجاذبية بين الجزيئات – تزداد الفوضى وتتزايد الأنتروبية . وصف بول دافيز (Paul Davies) هذا بقوله «إن الجاذبية تتسبب فى حدوث حالة عدم اتزان (information instability) كمصدر للمعلومات – كلما ازدادت المعلومات نقصت الأنتروبية. يمكننا أيضا اعتبار أنه عندما تنساب المعلومات من مجال الجاذبية وعندما تنهار سحابة من الغاز فإن الجاذبية تبتلع الأنتروبية لتذهب هى وطاقتها السالبة. إنها الطاقة السالبة للجاذبية التى تمكنها من

ابتلاع الانتروبية، مما يفسر عدم كون الكون فى حالة استقرار ثرموديناميكى فى الوقت الحاضر.

لكن لندع جانبا هذه الصورة الكبيرة عن الكون ونركز على ظهور الحياة على الأرض.

إن الجاذبية هى المسئولة عن تولد الانتظام فى الكون حتى وصلت إلى المستوى الحاضر وظهرت مخلوقات عاقلة (هى نحن) لنتساءل كيف حدث كل هذا؟ دون الدخول فى تفاصيل دقيقة فإن الجاذبية هى المسئولة عن الطاقة الحركية الهائلة التى اكتسبتها الجسيمات عن تسارعها ثم تلاقيها لكى نبدأ التفاعلات الحرارية النووية. أدى هذا إلى وجود توازن واستقرار ثرموديناميكى بين النجوم والوسط المحيط بكل نجم. وهكذا تنساب الطاقة إلى خارج النجم حتى تتساوى درجات الحرارة بداخله، أى أن سهم الزمن تحدد ثرموديناميكيا من الانفجار العظيم إلى المستقبل، إذن فالجاذبية هى التى تحدد إتجاه سهم الزمن.

إن كوكبا مثل الأرض يمثل نظاما مشتتا للطاقة، مفتوحا، تأتيه هذه الطاقة من الشمس . بهذا الانسياب من الطاقة تستمر الحياة على الأرض وتحفظ الكوكب فى حالة اتزان على حافة الشواش.

تستهلك النباتات هذه الطاقة فى عمليات التمثيل الغذائى، تتغذى الحيوانات على هذه النباتات، أما الحيوانات آكلة اللحوم فتأخذ طاقتها من الحيوانات الأخرى. لكن كيف تستخدم هذه النظم هذه الطاقة فى تنظيم نفسها؟ قام عالم الرياضيات الرائع آلان تيورينج (Alan Turing) (١٩١٢ - ١٩٥٤م) بدراسة ذلك وكان يركز على كيفية نمو الجنين من خلية وحيدة. لقد أُهملت أعمال تيورينج لفترة طويلة ولم ينتبه لها العلماء إلا بعد وفاته.

ولد تيورينج فى لندن فى عام ١٩١٢م، واشتُهر بأنه كان عضو الفريق الذى فك شفرة الاتصالات الألمانية خلال الحرب العالمية الثانية، كان اهتمامه الأساسى هو اختراع «الحاسوب العالمى» ما يسمى الآن «بآلة تيورينج» والذى باستطاعته حل أى مسألة. لقد كان مهتما بمسألة كيف يتكون الذكاء الإنسانى. كتب تيورينج مقالة فى عام ١٩٣٨م بعنوان «عن الأعداد القابلة للحوسبة» والتى قدم فيها لفكرة «آلة تيورينج» كان كل ذلك فى ذاك الوقت «تجربة ذهنية» ولكنها وضعت القاعدة لكل نظم الحاسبات الحالية وألقت الضوء على كيفية تكون وظهور النظم المعقدة.

كانت فكرة آلة تيورينج تكمن فى أنها تستخدم شريطا من الورق طوله لا نهائى مقسم إلى مربعات بها أرقام أو رموز يمكن قراءتها، ومن ناحية المبدأ يمكن محوها

وكتابة ورموز أخرى مكانها، لقد استبدل الشريط الورقى الآن بالشريط المغناطيسى أو بالقرص الصلب وغيرها. عندما تقرأ الآلة الرقم الموضوع فى مربع تعرف ماذا كانت سوف تتحرك للأمام أو للخلف؛ لتحسب عددا جديدا، ومتى تضعه فى هذا المربع وهكذا.

أثبت تيورينج أن مثل هذه الآلة قادرة على حل أى مسألة طالما يمكن وضعها بصورة منطقية «بلغة رمزية». كل هذا أصبح الآن معروفا لأى مبرمج مبتدئ – كيف يعمل الحاسب الآلى. ولكن فى عام ١٩٣٦م كان هذا إنجازا هائلاً، حيث جذب بذلك تيورينج الانتباه إلى تطبيق نفس الفكرة لدراسة كيف تتطور النظم إلى نظم معقدة، أو حتى إلى فهم كيف تنشأ الحياة. شرط هام لنجاح هذه الآلة هو أن تكون المسألة قابلة للضغط من وجهة نظر البرمجة.

بنهاية الحرب العالمية الثانية بدأ تيورينج فى بناء مثل هذه الآلات، وخلال الحرب طوّر الفريق الإنجليزى فى بلتشلى بارك (Bletchley Park) أول أجهزة حاسبات رقمية. لقد كانت أعمال تيورينج والفريق الذى فك رموز الشفرة الألمانية على وشك تحقيق حلم رتشاردسون فى إعادة اكتشاف الشواش، وذهب تيورينج أبعد من ذلك وكتب مقالة لم تنشر فى حياته، إذ بدأ فى الربط بين مثل هذه الآلات الحاسبة والشبكات العصبية للإنسان، كمحاولة لتبيان أن النظم الميكانيكية المعقدة يمكن أن تتعلم من التجربة وليس بالضرورة من خلال برمجتها فقط. بدأ تيورينج فى مانشستر فى عام ١٩٥٠م فى تطبيق هذه الأفكار على النظم البيولوجية والمخ البشرى. لقد تأثر تيورينج فى شبابه بكتاب «عن النمو والشكل» (On Growth and Form) للكاتب دارسى طومسون (D'Arcy Thompson) ولولا أنه انتحر فى عام ١٩٥٤م لاستطاع إكمال ما يعتبر أكبر إسهام فى العلم كله.

بالطبع لم يكن تيورينج يعلم بأعمال فرانسيس كريك وجيمس واطسون Francis Crick and James Watson عن الحمض النووى (DNA) فى كامبريدج والتى نشرت فى عام ١٩٥٣ . كان اهتمام تورينج منصباً على كيفية تطور الجنين من شكل كروى لاسمات له مكون من مجموعة من الخلايا . من الناحية الرياضية هى عملية انهيار التماثل، وهذه العملية معروفة للفيزيائيين فى مجالات أخرى (مثل تيارات حمل بينارد) ثمة انهيار التماثل فى عملية أخرى، وهى فقدان المغنطة فى المواد الفيرومغناطيسية، والتى عند تسخينها إلى درجة حرارة معينة تسمى بدرجة حرارة كورى، والذى اكتشف هذه الظاهرة فى عام ١٨٩٥م، درجة الحرارة هذه بالنسبة للحديد هى ٧٦٠°م. عند درجة الحرارة هذه، تغلب الطاقة الحركية للجزيئات على تأثير الترابط المغناطيسى، وتفقد المادة مغنطتها، وتسمى هذه العملية بتحول

الحالة، مثلها مثل تجمد الماء عند درجة حرارة الصفر المئوى. النقطة الهامة هنا أن مثل هذه الرؤية لم تطبق على أى من النظم البيولوجية.

نشر تيورينج فى عام ١٩٥٢م بحثا عن انهيار التماثل فى خليط متجانس من المواد الكيميائية بواسطة الانتشار الذى يحدث بين هذه المواد، كان عنوان هذه المقالة «القاعدة الكيميائية وراء التكون التشكيلى». لم يكن عمل تيورينج يتعلق بقطرة حبر تنتشر فى كوب ماء ونتصور الحبر يبدأ فى التجمع ثانية، أى فى عملية معكوسة كان عمل تيورينج يتعلق بمادتين كيميائيتين متفاعلتين. تعتمد العملية كلها على وجود ما يسمى بالحافز والذى يحفز تفاعلا كيميائيا معينا على النقيض توجد مواد تبطئ تفاعلا كيميائيا معينا أيضا تسمى هذه المواد بالكابح.

لقد اختار تيورينج نظاما، بحيث يكون الحافز لإنتاج مادة (A) هو نفسه حافزا لإنتاج مادة أخرى (B)، ولكن المادة B كابح للتفاعل الذى ينتج المادة A. كان اقتراح تورينج أنه فى لحظة تكون المادتين A , B سوف ينتشران فى الخليط بمعدلين مختلفين، بحيث فى بعض الأماكن سوف يكون هناك تركيز أكبر للمادة A وفى أماكن أخرى سوف يكون هناك تركيز أكبر للمادة B. استخدم تورينج معادلات مبسطة، لأن الحاسبات فى ذلك الوقت كانت قاصرة وإمكاناتها محدودة – وكانت كل حساباته على الورق، مما يعنى أنه استخدم معادلات خطية بدلا من المعادلات اللاخطية الحقيقية . وُجد أن هذه المعادلات غير مستقرة بشكل كبير، وأى خطأ بسيط فى أى خطوة يؤدى إلى خطأ كبير فى الخطوات التالية. رغم كل هذا التبسيط كانت الصورة واضحة. وجد تيورينج أن مفتاح الموضوع كله يكمن فى التنافس بين المادتين A , B ولابد للمادة B أن تنتشر بسرعة أكبر من انتشار المادة A ، بحيث يكون تكون المادة A فى حيز ضيق، أما كبح المادة B لتكون A سوف ينتشر فى حيز أوسع وأوسع فى الخليط كله. انتشار المادة B بسرعة أكبر سوف يسمح بتكون المادة A بقدر معقول.

إذا افترضنا أن لون المادة A هو الأحمر، وأن لون المادة B هو الأخضر، فإنه بدلا من إناء يحوى مخلوطا عديم اللون، سوف تحصل على إناء يحوى خليطا أخضر اللون به بقع حمراء، وتظل الصورة مستقرة طالما نغذى الخليط بالمكونات الأولية ونزيح المواد الناتجة من التفاعل. مرة أخرى حصلنا على نظام مفتوح نحافظ عليه فى حالة عدم اتزان. وصف تيورينج أيضا نظما ديناميكية، حيث تتوالى وتتحرك المناطق ويتغير لونها، مما يؤكد أن النظام ديناميكى. لقد سمى تيورينج الحافز «الفاعل» وسمى الكابح «بالسم». أهم جانب فى أعمال تيورينج أنه قدم حلا كيميائيا لانهيار

التماثل وتكون أشكال فى نظام كان فى البداية متجانسا – هذا إذا كان هناك نظام كيميائى يسلك هذا السلوك.

برغم الأهمية والأفكار الخلاقة التى كانت بهذه المقالة التى نشرها تيورينج، لم يتنبه أحد لكل هذا فى الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين، ربما لأنه لم تكن هناك منظومة كيميائية يمكن أن تسلك هذا السلوك. لم يلتفت إلى عمل تيورينج هذا أى من العلماء فى مجالات الكيمياء أو علوم الحياة أو غيرها، إلا شخص واحد – الروسى بوريس بيلاأوسف "Boris Belousov" والذى كان يعمل فى وزارة الصحة السوفيتية ولم ير أعمال تيورينج ولا تيورينج علم بعمل بيلاأوسف حتى مماته المفاجئ.

كان بيلاأوسف يدرس كيف يتكسر الجلوكوز فى الجسم وتتحرر الطاقة الكامنة به. إن تكسر الجلوكوز يتحفز بواسطة إنزيم مثله مثل عمليات الأيض (Metabolism) الأخرى. أعد بيلاأوسف محلولا، ولدهشته وجد أن المحلول يغير لونه من الحالة الشفافة التى لا لون لها إلى الأصفر ويعود مرة أخرى إلى الشفاف وبشكل دورى متتالٍ ومتكرر، لقد كان ما يراه بيلاأوسف يناقض القانون الثانى للديناميكا الحرارية وكان الزمن يغير من اتجاه سهمه إلى الأمام وإلى الخلف. فى نفس الوقت لم يكن لنعقل أن كلتا الحالتين أكثر استقرارا (كون المحلول عديم اللون وعندما يتلون باللون الأصفر) من كل الحالات الأخرى.

لم يكن ليندهش بيلاأوسف لو كان يعلم بأعمال تيورينج أو عمل عالم الرياضيات النمسوى ألفريد لوتكا (Alfred Lotka) (١٨٨٠ – ١٩٤٩م) والذى توصل إلى نموذج رياضى لنظام كيميائى متذبذب بهذه الطريقة. ثمة عالم آخر الإيطالى ڤيتو ڤولتيرا (Vito Volterra) (١٨٦٠ – ١٩٤٠م) وجد أن معادلات لوتكا تصف كيف أن تجمعات الأسماك تتذبذب بهذه الطريقة عندما تتفاعل النوعيات المفترسة والنوعيات الفريسة، فيمر تجمع الأسماك بدورات تناقص وأخرى تزايد بشكل دورى. نشر ڤولتيرا عمله هذا فى الثلاثينيات من القرن العشرين.

فى عام ١٩٢١م وجد العالم الكندى المولد وليام براى (William Bray) (١٨٧٩ – ١٩٤٦م) – والذى عمل بجامعة بركلى فى كاليفورنيا – أن التفاعل الكيميائى بين بيروكسيد الأيدروجين وأيوداته (Hydrogen Peroxide and Io-dates) تنتج يودا وأكسچين بنسب تتذبذب بالطريقة التى وصفها لوتكا. ورغم أن براى كتب إنه يؤكد صحة نموذج لوتكا إلا أن كل زملائه لم يتقبلوا منه هذا العمل، وقالوا إن شيئا ما خاطئ فى تجاربه. كان كل من لوتكا، ڤولتيرا وبراى قد ماتوا عندما حاول بيلاأوسف نشر مقالة عن بحثه فى عام ١٩٥١م، أى قبل أن

يحاول تيورينج أن ينشر بحثه الرائع بعام واحد. بنفس الروح رفضت مقالة بيلاأوسف حيث أن التجربة تناقض القانون الثانى للديناميكية الحرارية.

كان للقانون الثانى للديناميكية الحرارية مكانة عالية فى العلوم بحيث أن كل نظرية أو تجربة تناقضه ترفض دون نقاش، وبل ويتهم مقدمها بالخطأ الجسيم أو التلفيق، كما ورد فى كتاب العالم البريطانى أرثور إدينجتون (Arthur Eddington) وهو العالم الفذ الذى نشر كتابا بعنوان «طبيعة العالم الفيزيائى» (The Nature of Phyical world) فى عام ١٩٢٨ والذى يقضى بأن القانون الثانى للديناميكا الحرارية فوق كل شيء. إننى بهذا لا أقضى بعدم صحة القانون الثانى، ولكن أقول بأنه لا يسرى على النظم غير المستقرة حين يكون للجاذبية دور فعال.

ولكن كل هذا لم يكن معروفا فى عام ١٩٥١م،عندما رفضت مقالة بيلاأوسف كان رد فعله شديدا، وأصيب بإحباط شديد وترك العمل فى هذا المجال تماما. حاول زميله شنول (Shnoll) أن يحثه على المثابرة ولكن دون جدوى. فى محاولة أخرى نشر بيلاأوسف ملخصا من صفحتين لتقرير مطول يحمل عنوانا مختلفا، ونشر بالروسية فقط، ولم يعرف عنه شيء خارج الاتحاد السوفيتى.

لم يفقد شنول حماسه لعمل بيلاأوسف وكلف أحد طلابه وهو أناتولى چابوتينسكى بمواصلة هذا العمل. توصل چابوتينكسى إلى خليط تظهر فيه هذه التغيرات التى شاهدها بيلاأوسف وبشكل درامى أكبر. نشر چابوتينسكى هذه النتائج فى مؤتمر عالمى فى براج فى عام ١٩٦٨م ، وانبهر علماء الغرب بسلوك هذه المخاليط والتى سميت بتفاعلات بيلاأوسف – چابوتينسكى، ولقى قبولا؛ لأن هؤلاء العلماء كانوا مطلعين على أعمال تيورينج، ولكنهم لم يتصوروا أن ذلك ينطبق على تفاعلات كيميائية حقيقية.

كان إليا بريجوچين أول شخص يضع نموذجا رياضيا يصف ما يحدث فى تفاعلات بيلاأوسف – چابوتينسكى. كان بريجوچين قد قابل تيورينج فى إنجلترا فى عام ١٩٥٢م، بعد قليل من نشر تيورينج لعمله الخاص بالتفاعلات الكيميائية التى تعطى «أشكالا» (Patterns)، توصل بريجوچين إلى تحضير مادتين كيميائيتين تتحولان إلى مادتين أخرتين بعد تحولهما إلى مادتين وسيطتين انتقاليتين تتولدان ثم تتحولان بعد فترة زمنية قصيرة. سمى هذا النموذج باسم فاعل بروكسل (Brusselator) – كل ما يهمنا فى هذا – دون الدخول فى تفاصيل – أن هذه التفاعلات تتضمن لاخطية وتغذية خلفية. هذه التفاعلات تظهر ضرورة تعديل القانون الثانى حتى يمكن تطبيقه على النظم البعيدة عن حالة الاستقرار، والتى طورها بريجوچين ورفاقه.

في السبعينيات من القرن العشرين حدث تقدم كبير فى نمذجة ودراسة النظم الكيميائية التى تظهر بها بنيات تنشأ عن العوامل التى تؤدى إلى أن هذه النظم تنظم نفسها بنفسها، إضافة إلى ذلك توصل الكيميائيون إلى تفاعلات كيميائية تولد موجات على شكل دوائر مركزية وأشكال حلزونية من اللونين الأحمر والأزرق، والتى تنشر بعيدا في الوسط وتتباعد عن مصدر تولدها، وأخيرا فى تسعينيات القرن العشرين تمكن الكيميائيون من توليد أشكال ثابتة (stationary) (موقوفة) بها بقع مثل تلك التى وصفها تيورينج فى السبعينيات من القرن العشرين. قامت مجموعة من الباحثين فى جامعة أوريجون بالتوصل إلى وصف الخطوات التى تتم بها هذه التفاعلات - وحضّروا فعلا ستة مركبات كيميائية تتفاعل بعضها مع البعض فى خمس خطوات مميزة مستخدمة خاصة الحافز التلقائى (Autocatalysis). أصبح هذا النموذج يسمى بأوريجوناتور (Oregonator). الأبعد من هذا أن هذه التفاعلات تستقر عند حالة معينة طالما لا تضاف المركبات الكيميائية التى تبدأ التفاعل. عند إضافة هذه المركبات تبدأ التفاعلات مرة إخرى، وهنا نقول إن النظام تشعب تشعبا ثنائيا (Bifurcation) من زمن دورة قدره الوحدة إلى زمن دورة قدره اثنان. فى ظروف معينة يمكن أن يتشعب النظام إلى نظام رباعى زمن الدورة وهكذا. بعد هذا يمكن أن ينتقل النظام إلى حالة الشواش. كل هذا يمكن وصفه من خلال الفراغ الطورى - الدورات الحدية - الجاذبات مثل الأمثلة السابقة التى سقناها.

برغم أن كل هذا أخذنا بعيدا عن الفكرة الأساسية لتورينج التى تحاول وصف كيفية تطور الجنين، إلا أن كل هذا مفيد تماما لهذا الموضوع، وذو علاقة وثيقة به كما سنرى.

نعنى بهذا نجاح استخدام نموذج تورينج فى وصف تكون الخطوط والشرائح والبقع على جلود وفروات الثدييات. رائد هذا النوع من البحث هو العالم جيمس ماراّي (James Murray) ، والذى نشر فى مجلة سينتيفك أمريكان (Scientfic American) فى عام ١٩٨٨م بعنوان «كيف يكتسب النمر بقعا على جلده»، وعرض مراى هذه الرؤى أيضا فى كتابه عن «البيولوجيا الرياضية (Mathematical Biology)» . وجد طراى أن الخطوط على الحمار الوحشى، والبقع على جسم الزرافة وحتى غياب أية أشكال على أجسام الفئران والأفيال، كل ذلك يمكن تفسيره بعملية بسيطة، عبارة عن انتشار مادة فاعلة "Actuator" ومركبات كيميائية مثبطة (كابحة) على سطح الجنين الذى ينمو وذلك فى مرحلة حاكمة من مراحل نموه، لم يثبت أحد حتى الآن أن هذه الطريقة هى التى تحدث فعلا، ولكن ما يمكن قوله أن هذا يمكن أن يحدث بهذه الطريقة فى مرحلة ما وبلغة الحمض النووى (DNA)

حيث تختزن الشفرة التى تصف بنية جسم ما؛ والتى تقضى «بإفراز هاتين المادتين الكيميائيتين عند هذه المرحلة من التطور» مما يستلزم اختزان كمية صغيرة من المعلومات، مقارنة بالتسليم بوجود بصمة وراثية تحدد بالضبط شكل ومكان كل بقعة أو خط على جسم الكائن البالغ. أكثر من هذا - إذا كانت هناك عملية واحدة تصف كيف تتكون الأشكال المختلفة لحيوانات مختلفة، فهذا أفضل من افتراض وجود بصمات مختلفة لكل حيوان ولكل فرد من نوع هذا الحيوان، وفوق ذلك كله، فهذه الرؤية تساهم أيضا فى فهم عملية التطور ذاتها كما سنرى. لابد أن نذكر هنا أن هذا المدخل تنطبق عليه الحكمة المأثورة للفيلسوف الإنجليزى وليم أوكهام(*) أن لابد من الأخذ بالحل الأبسط ما لم يكن هناك موانع أخرى أساسية، وتسمى هذه المأثورة «بالحد القاطع لأوكهام "Okham's Razor"

من هذا المنطلق نجد أن عملية تورينج هى الحل الأبسط لهذا اللغز. إن الأشكال التى نراها على أجساد الحيوانات الثديية هى إما ألوان الجلود أو ألوان الشعر الموجود على أجسامها، فى أى حالة فهى أشياء ما فى الجلد التى تحدد اللون. من المدهش أن هذه الألوان هى الأبيض، الأسود والبنى مع بعض الألوان البرتقالية - الصفراء - تتحدد هذه الألوان بوجود أو عدم وجود صبغات تفرزها الخلايا فى الجلد وتحدد كمية هذه الصبغات شدة اللون، اليوميلانين (eumelanin) يعطى إما اللون الأسود أو البنى والفيوميلانين (Pheomelanin) الذى يعطى اللون الأصفر أو البرتقالى (غياب أى من الصبغتين يترك الجلد أبيضا. إن نجاح مراى يكمن فى أنه بالنظر إلى الأشكال الموجودة فى الواقع على جلود الحيوانات هى نفس الأشكال التى تتولد عن تفاعلات تيورينج مع وجود فاعل وكابح على سطح جسم الجنين فى الأسابيع الأولى بعد التلقيح (هناك قرينة بأن ذلك يحدث بالنسبة للحمار الوحشى خلال فترة ٢١ - ٣٥ يوما بعد التلقيح مع فترة حمل تبلغ ٣٦٠ يوما)، إذا كان وجود إحدى المواد الكيميائية تسبب فى بدء الخلية إفراز الميلانين، سوف تكون النتيجة أشكالا مشابهة لتلك التى تحدث فى تجربة «الإناء الضحل» حسب تفاعلات بيلاأوسف - جابوتينسكى، وسوف لا تظهر إلا عندما تفرز مادة كيميائية أخرى وتعطى إشارة لكل خلايا الجلد، ولكن سوف تتأثر فقط تلك الخلايا التى تحوى الميلانين والتى تحددت سابقا فى تفاعل تيورينج.

وحيث إن هذه العملية عبارة عن موجات تنتشر عبر الأسطح، تتأثر نتائج هذه العملية باتساع وشكل هذه الأسطح. يورد مراى مثالا مناظرا من انتشار الموجات الصوتية الناتجة عن غشاء متذبذب، وتتحدد نوعية هذه الموجات حسب اتساع الوسط

(*) وليم أوكهام (Willam Okham) - فيلسوف وعالم منطق إنجليزى (١٢٥٨ - ١٣٤٩م).

الذى تنتشر فيه. إذا كان السطح صغيرا جدا فسوف لا تعمل ميكانيكية تيورينج، ويمكن أن نقول إن «طول الموجة» أكبر من السطح نفسه، أو للتوضيح، كاستخدام فرشاة كبيرة لرسم أشكال صغيرة جدا. من ناحية أخرى إذا كان السطح كبيرا جدا فليست هناك فرصة لظهور هذه الأشكال، وذلك مثل تواجد أشخاص عديدة فى فرقة صغيرة والكل يتحدث بصوت عال، وتكون النتيجة خلفية متوسطة من الضوضاء ليس لها شكل معين، فمثلا عند التدقيق فى جسد الفيل نجد أن شعيراته لا تحمل نفس اللون ولكن النظر من بعد يعطى انطباعا بأنه جسد بلا لون، وعندما يكون هناك ازدحام فى غرفة والكل يتحدث بصوت عال،يمكن تمييز ما يقوله فرد واحد عند الاقتراب منه جدا. الخلاصة أنه عندما يكون الحيوان صغيرا جدا أو كبيرا جدا فإن جلده يخلو من أية أشكال، وهذا ما نراه يحدث فى الطبيعة.

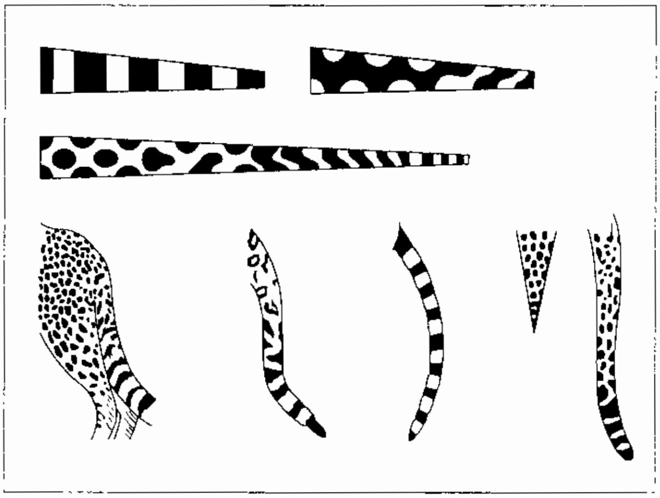
ولكن ماذا عن الحالات التى تقع بين هذا وذاك؟ وُجد أن أول شكل يمكن أن يحدث هو الشرائط العريضة ثم شرائح يتبعها بقع ثم بقع كبيرة، ولكن بالنسبة للأسطح الكبيرة تتحول البقع الكبيرة إلى لون متجانس، وهكذا نرى أن هذه الأشكال تتراوح بين البقع على جسم الفهد، والشرائط على جسم النمر أو الحمار الوحشى إلى البقع الكبيرة على أجسام الزرافات.

ولكن ليس بالضرورة أن يحمل الحيوان على جسده أية أشكال، يمكن لهذه الميكانيكية أن تنغلق، ولذا فإن الدب القطبى يكون لونه بالكامل أبيضا.

من الشواهد المقنعة، الأشكال التى تتكون على ذيول الحيوانات فى عائلة القطط الكبيرة، بالنسبة للذيول الأسطوانية، تتكون أشكال إما بقع أو شرائط دائرية أو شرائح حول الذيل، كما فى شكل ٤-٢.

سمة أساسية فى هذا النموذج أن نوع الأشكال التى تتكون لا يعتمد على حجم الحيوان البالغ، وإنما على حجم وشكل الجنين عندما تبدأ عملية تيورينج. فى نفس الوقت هناك ارتباط بين حجم الجنين وحجم الحيوان البالغ، فحجم جنين الفأر أقل من حجم جنين الفيل بالتأكيد، ولكن أهمية حجم الجنين تبدو واضحة فى الفارق فى الشرائح التى تتكون على جسدى نوعين من الحمار الوحشى إيكوى بورتشيللى "Equus Burchelli" ونوع إيكوس جريڤى "Equus Grevyi". يحمل الأول شرائح أعرض يجلعها متميزة عند النظر إليها وهى الواحدة بجانب الأخرى رغم أن حجم الحيوانين البالغين متساويين تقريبا. وجد ج. ب. ل. بارد "J. B. L. Bard" فى السبعينيات أن الأشكال التى نراها على نوع بورتشيللى لابد وأن تكون بدأت على الجنين عندما كان عمره ٢١ يوما، ولكن بالنسبة لنوع جريڤى فيكون عمره خمسة أسابيع. يظهر جليا هنا دور الوراثة والوسط المحيط، وقد تأكد هذا

عند مولد أول قط محور جينيا فى عام ٢٠٠٢م. نظرا لأن تشكل الألوان فى الحيوانات متعددة الألوان يعتمد على مورثاتهم الجينية بالإضافة إلى كمية التغذية التى يتلقاها الجنين، لم تكن الألوان التى حملها القط المحور مثل تلك الألوان التى تحملها أمه، رغم أنهما يحملان نفس الحامض النووى (DNA) .



شكل (٤-٢) الأشكال التى تتكون على جسم حيوان نتيجة الانتظام الذاتى للعمليات الكيميائية خلال فترة نمو الجنين ترتبط بحجم الحيوان. تؤدى عمليات الانتشار الكيميادية إلى تكون شرائح على الأسطح الصغيرة، وبقع على الأسطح الكبيرة.

ينقلنا كل هذا إلى التمعن فى عملية التطور ذاتها، إن الفارق بين الشكلين اللذين يتكونان على جلود نوعى الحمار الوحشى دليل تغير موعد بدء عمل نموذج تيورينج. كما نعلم فليس لأى شكل منها ميزة تطورية، ما يعنى أنه ليس كل سمة تشريحية يمكن أن تكون تأقلمية (adaptive) ولكن إذا كانت هناك ميزة فى كون الشرائح أضيق (أو أوسع)، ربما يكون وسيلة للتخفى، بهذا من السهل أن نرى أن التفاوت بين كل فرد وآخر هو مادة خام لكل هذا النوع من الحمار الوحشى للاستجابة لضغوط الاختيار، ويتم كل هذا بمجرد تغير توقيت حدث ما معين خلال تطور الجنين، وهذه تعتبر أبسط أنواع التحور (mutations) التى يمكن تصورها، وهناك الأكثر والأكثر الذى سوف نورده بخصوص التطور.

هناك بجانب ميكانيكية تكون الأشكال المميزة للثدييات، والتى كما رأينا تؤكد دور تفاعلات بيلاأوسف - چابوتينسكى ، إلا أننا لن نورد أمثلة أخرى، حيث إنها تتم بنفس الصورة طبقا لنموذج تيورينج.

جانب أساسى آخر، هو الخلط الذى يحدث بين مفهومى التطور ومبدأ دارون

عن عملية «البقاء للأصلح» والعلاقة بينها. إن التطور هو حقيقة نراها فى الكائنات الحية الآن وفى الحفريات التى تم الكشف عنها، مثلها فى ذلك مثل دوران القمر حول الأرض وسقوط التفاحات للأسفل، تصف ميكانيكا نيوتن هذا النوع من الحركة، ولكن لابد لنا أن ننتقل إلى النظرية النسبية عند محاولة وصف انهيار النجوم. إن نظرية دارون بالنسبة للتطور مثل نظرية نيوتن بالنسبة لحركة الأجسام، حيث تمثل نظرية دارون أساس تفسير عملية التطور ولكن لابد من تعديلها. تقضى نظرية دارون بتطور الأنواع من جيل لآخر مما يؤدى أيضا لتنوع واختلاف بين أفراد الجيل الواحد، إن الأفراد الذين يتوافقون بأفضل قدر مع البيئة المحيطة يكون أداؤها فى الحياة أفضل ما يمكن من حيث الحصول على الغذاء الكافى، والتكاثر (وهذه نقطة فى غاية الأهمية)، ولذا يخلفون عددا أكبر من «الصغار» للجيل التالى. وحيث أن الصغار يشبهون الآباء فإنهم سوف يكتسبون الصفات الجيدة التى كانت سببا فى نجاح آبائهم، وربما ببعض الفروق الطفيفة، وهكذا فى الأجيال التالية.

هذه هى عملية الانتقاء الطبيعى والتى تُبقى على الأصلح (من ناحية التأقلم وليس القوة) وإن كانت الصفتان يمكن أن يحدثا معا، وهكذا فى كل جيل. المثال الكلاسيكى لذلك هو أنه إذا كانت الحيوانات ذوات الرقبة الطويلة أقدر على الوصول إلى الأوراق على قمم الشجر والتى بها كمية أكبر من العصير النباتى فإن ذلك يساعدها على حياة أفضل وتترك أبناءً أكثر – أما الحيوانات قصيرة الرقبة فإنها فاقدة لهذه الخبرة، وبالتالى تترك أبناءً أقل. بهذا نجد أنه من جيل لآخر تطول رقاب هذه الحيوانات كما هو الحال بالنسبة للزرافات، وهناك فروق فردية بين الزرافات من حيث طول الرقبة. وهكذا نرى أن التنوع هو سمة أساسية من سمات الحياة ذاتها. تظهر نظرية دارون كيف أن الكائنات تؤقلم نفسها بحيث تتوافق مع البيئة المحيطة مثل المفتاح بالنسبة للقفل، وتسمح هذه النظرية أيضا بفروق فردية كبيرة أحيانا تفوق الفروق بين نوعين من نفس الحيوان، مثلما رأينا بالنسبة للحمار الوحشى. لقد اتسع نطاق دراسة ميكانيكية تيورينج فى أعمال ملراى وغيره عن صفات أخرى فى الكائنات الحية. فى هذا الصدد نذكر أعمال هانز ماينهارت (Hans Meinhardt) وأندرية كوخ (Andre' koch) اللذين طورا نموذجا رياضيا لكيفية عمل نموذج تيورينج الذى يقضى بإفراز المادة الفاعلة (Actuator) فى أماكن عشوائية على جلد الجنين خلال نموه. كانت الميزة فى هذا النموذج أنه يؤدى إلى أشكال أكثر تعقيدا رغم أن الكيمياء بسيطة جدا. لقد ترسخ هذا المبدأ، بحيث يؤمن الكثير من البيولوچيين بأنهم تمكنوا من رصد بعض الحيوانات البحرية التى توضح هذه الميكانيكية أثناء عملها. فى السمكة الملائكية (Pomachantus imperator)

(Angelfish) توجد على جسم الذكر شرائط طولية تمتد من الرأس للذيل. عند نمو السمكة تتكون شرائط جديدة بحيث تبقى الشرائط القديمة بنفس الحجم وتظل الفراغات بين هذه الشرائط بنفس الاتساع. تنمو الشرائط الجديدة على شكل تفرعات من الشرائط القديمة كما يتفرع شريط السكك الحديدية حتى يصبح شريطين. تمكن كل من شيجيروكوندو (Shigero Kondo) وريهيتو أساهى (Rihito Asahi) فى جامعة كيوتو (Kyoto University) من تطوير نموذج رياضى يعطى نفس هذه الأشكال باستخدام نموذج يتورينج. يؤكد هذا أن ميكانيكية تورنج مازالت تعمل بالحيوان البالغ وليس فقط فى الجنين أثناء نموه، مما يعطى الأمل فى اكتشاف هذه المواد الكيميائية التى تؤدى إلى هذا التطور.

استخدمت نماذج مشابهة لدراسة الأشكال التى تتكون على أجنحة الفراشات، فلقد درس ماراى سمات هذه الأشكال ووجد أنها شبيهة بالعيون (لقد تطورت هذه الأشكال لكى توهم أى كائن مفترس ينظر لهذه الفراشات من بعد أن يتصور أنها ليست فريسة سهلة وإنما عيون مخلوق كبير يحملق فيه) أدت دراسة هذه الأشكال إلى أنها يمكن أن تتكون بكيمياء بسيطة دون الحاجة لحفظ بصمة وراثية معقدة فى الفراشات، مما يدعم وجهة النظر بأن هذه الأشكال هى نتيجة التطور، ولكن جانبا مهما فى هذه الدراسة أوضح أنه يمكن لهذه الكيمياء أن تؤدى إلى اختلافات بسيطة لكنها مهمة. توصلت هذه الدراسة إلى أن حجم هذه البقع يعتمد على درجة الحرارة وكلما ازدادت درجة الحرارة كلما كبرت البقع.

أهمية هذه النقطة تكمن فى أن تغيرات بسيطة فى البيئة المحيطة يمكن أن تؤدى إلى تغيرات كبيرة فى تأثيرها فى الكائن عندما تصل الأمور إلى نقطة معينة حرجة، بحيث تنتقل الميكانيكية إلى صيغة أو أسلوب آخر. لقد أعطى ماراى مثالا آخر يوضح هذه النقطة، وهو كيفية نمو أطراف الثدييات ، فإذا حدث نوع من الخلل عند نمو الأصابع فليس بالضرورة أن يؤدى هذا إلى أصابع أقصر أو أطول وإنما إلى نمو أصبع سادس مثلا. يمكن أن يحدث هذا بشكل طبيعى عن طريق التحور (mutation) أى عن طريق تغير طفيف فى البصمة الوراثية، ناتج ربما عن خطأ فى النسخ (copying error) الذى يؤدى إلى تغير طفيف فى التطور. سوف ينتقل هذا التغيير إلى الأجيال التالية مالم يكن هذا التحور ضارا. يفسر هذا لماذا تجرى مثل هذه الأمور فى العائلات، مثل عائلة آن بولين (Ann Boleyn) إحدى زوجات هنرى الثامن (Henry VIII) والذى ولد وله ستة أصابع على يد واحدة وإن كان قد قطع الإصبع السادس بسرعة. مثال آخر هو رجل من مدينة بوسطن بالولايات المتحدة الأمريكية والذى كان له يد مزدوجة بدون إبهام وسبعة أصابع مرتبة

على مجموعتين تحوى إحداها ثلاثة أصابع والأخرى أربعة على جانبى المكان الذى كان من المفترض أن يكون به الإبهام. يمكن أن يحدث هذا أيضا عند تطعيم خلايا برعم طرف على آخر (وأجريت مثل هذه التجارب فى لندن، وقد أجراها العالم لويس ولبرت (Lewis Wolpert) ورفاقه على الكتاكيت)، أمكن إجراء هذه التجارب فى نماذج محاكاة باستخدام ميكانيكية تيورينج فى نظم مشتتة على حافة الشواش. النقطة الحاكمة هنا أنه فى مثل هذه النظم أى تغير بسيط فى البيئة المحيطة أو أى تحورات بسيطة تؤدى إلى تغيرات كبيرة بشكل الجسم الذى يتطور.

هذه هى بعض الأمور الجديدة التى لم تكون معروفة لداروين والتى ترينا كيف يحدث التطور وما هى نتيجة هذا التطور.

الخلاصة أن فى النظم المشتتة يمكن أن تحدث تغيرات طفيفة أو أخرى كبيرة وخاصة عندما تكون قرب حالة الشواش. إن فهم كل هذا بالقدر المطلوب سوف يساعدنا على تفسير كيف تظهر الحياة نفسها والذكاء أيضا.

الباب الخامس

الزلازل، الانقراض والنشوء

عندما يتحدث العلماء عن «النظم المعقدة» يترسخ الانطباع أن هذه النظم يصعب فهمها، ولكن هناك نوع من اللبس، فكلا الفرضين خاطئ؛ فليست النظم المعقدة معقدة فعلا ولا يستحيل فهمها. النظم المعقدة ما هى إلا نظم مكونة من نظم أبسط تتفاعل أجزاؤها مع بعضها البعض. إن نجاح العلم منذ جاليليو ونيوتن يكمن فى تجزئة هذه النظم إلى مكوناتها البسيطة لتفهم كيف تتفاعل هذه المكونات بعضها مع البعض، ففى الكثير من الأحيان نفترض أن هذه المكونات أبسط مما هى عليه فى الواقع وذلك لكى يسهل فهمها. من الأمثلة الهامة على هذه الرؤية هو كيف نفهم تفاعلات الذرات والجزيئات فى التفاعلات الكيميائية بصرف النظر عن تركيب النويات التى تتكون منها هذه الذرات والجزيئات، وكذلك عند دراسة تصادمات جزيئات غاز ثانى أكسيد الكربون فى صندوق ما يحويها لا نهتم بالتركيب الداخلى للجزيئات ولا ندخل فى الاعتبار أنها مكونة من ذرة كربون وذرتى أكسجين. جانب هام هنا أن نموذج الكرات الصلبة ينطبق على كل الغازات وليس ثانى أكسيد الكربون فقط. بنفس القدر يمكن أن نذكر هنا ما يسميه علماء الرياضيات بالأعداد المركبة، وهى الأعداد التى تحوى التعبير الرياضى $i = (\sqrt{-1})$ ويكتب العدد على شكل $(X = A + i B)$. كل الذى يهمنا هنا هو أنه توجد مجموعة من القواعد للتعامل مع مثل هذه الأعداد المركبة، هذه القواعد بسيطة جدا، فهى مثلا أبسط من قواعد لعبة الشطرنج، ولكنها فتحت آفاقا عديدة فى الرياضيات والفيزياء؛ إذ تجعل مثلا وصف سلوك الدوائر الكهربية للتيار المتردد سهلا وميسورا لطلاب المراحل الأولية فى الجامعات وحتى فى المدارس، وكذلك فى ميكانيكا الكم.

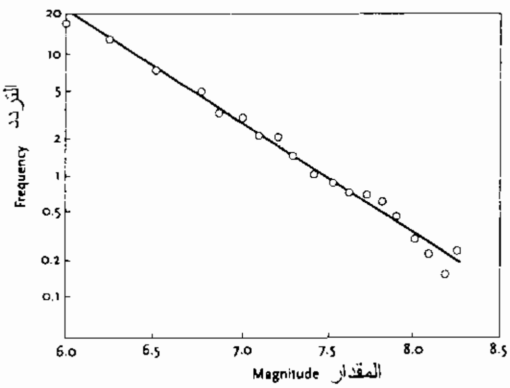
بالنسبة للآلات فمن أبسط الآلات العجلة والرافعة والعجلة المسننة مثل تلك التى توجد بالدراجة فكلها آلات بسيطة. يلقى كل هذا الضوء على التعقيد بأنه الطريقة التى تتفاعل بها المكونات مع بعضها البعض، خاصة أن كومة من العجلات والروافع ليست نظاما معقدا بالتأكيد، حتى وإن كانت الكومة تمثل المكونات اللازمة لعمل دراجة سباق. يمكن أن نقول إن المكونات البسيطة لابد وأن تتفاعل مع بعضها البعض حتى ينتج ما أكبر من مجرد حاصل جمع هذه المكونات، وهذا هو التعقيد المبنى على البساطة العميقة.

عندما يواجه العلماء نوعا من التعقيد فإنهم وبشكل غريزى ينظرون إلى المكونات البسيطة للنظام وكيف تتفاعل هذه المكونات مع بعضها البعض، ثم ينتقلون للكشف

عـن القانون (أو القوانين) التى تحكم تفاعل هذه المكونات وسلوكها، بعد ذلك يحاول العلماء الكشف عما إذا كانت هناك نظم أخرى تتبع نفس القوانين.. وهكذا... ثبت نجاح هذا الفكر على مدى ثلاثمائة سنة، خاصة مع النظم المختلفة القريبة من الاتزان. الآن نحاول تطبيق هذه الطريقة على النظم التى تفقد جزءا من طاقتها مع الوقت وقرب الشواش – بالنسبة للنظم الأرضية ليس هناك أفضل من مثال الزلازل.

من أهم الأسئلة التى تُثار حول الزلازل هو متى تحدث الزلازل؟... بصرف النظر عن الأهمية الأكاديمية – يمثل هذا السؤال أهمية عملية بالنسبة للقاطنين فى مناطق موبوءة بالزلازل، وكذلك لشركات التأمين وغيرها ... من المعروف أنه فى بعض المناطق تحدث زلازل متباعدة ولكن عنيفة، وفى مناطق أخرى تحدث زلازل متقاربة على فترات قصيرة ولكنها ليست شديدة. بدلا من مجرد التخمين، لتنظر إلى الصورة الفعلية لحدوث هذه الزلازل فى منطقة ما، وحصر وتسجيل تكرارية نوع معين من الزلازل. لقد كان تشارلز ريختر (١٩٠٠ – ١٩٨٥) أول من قام بمثل هذا العمل، وأدخل أول مقياس لشدة الزلازل، والذى يحمل الآن اسمه.

كما هو واضح فى شكل (٥–١) فإنه كلما زادت شدة الزلزال انخفضت تكراريتـــه، وحيث أن مقياس الرسم لوغاريتمى(*) فإنه كلما زادت شدة الزلزال كلما تباعدت فترات حدوثه عشرات المرات، لقد توصل بينو جوتنبرج (١٨٨٩ – ١٩٦٠م) إلـــى القانون الذى يحمل اسميهما (قانون ريختر – جوتنبرج) والذى يقضـــى وكمثال بأنه لكل ألف زلزال بشدة ٥ على مقياس ريختر، يتوقع ١٠٠ زلزال بشـــدة ٦ وعشرة زلازل بشدة ٧ على نفس المقياس .. وهكذا .. هذا مثال

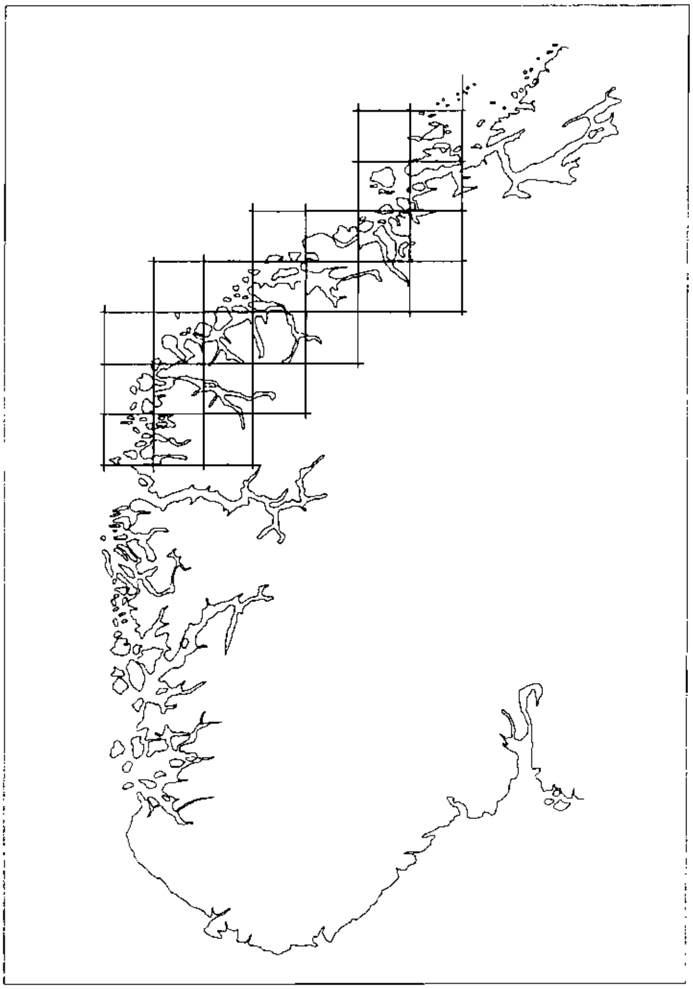


شكل (٥–١) يربط قانون ريختر جوتنبرج شدة الزلازل وتكراريتها.

(*) المقياس اللوغاريتمى: هو مقياس رسم يستعاض فيه عن الرقم بقيمة لوغاريتمه وذلك يتيح تمثيل أعداد كبيرة فى مدى صغير .

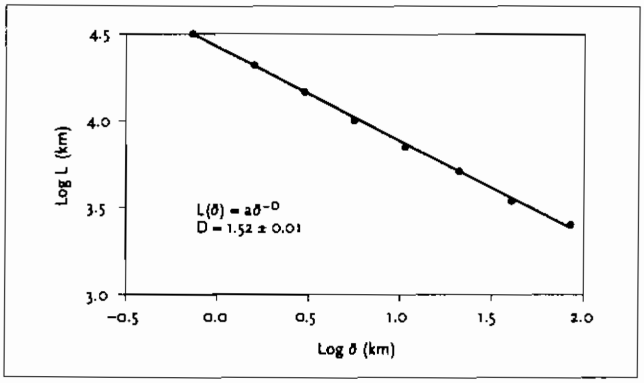
واضح على القانون البسيط الذى يحكم ظاهرة تبدو لأول وهلة شديدة التعقيد. لكن هـذا القانون يعنى أن زلزالا بشدة قدرهـا ٨ يكون أعنف بعشرين ألف مليون مرة من زلزال شـدته الوحدة - الذى يماثل اهتزاز مبنى من جراء مرور سيارات نقل ثقيلة بجوار المبنى.

كـل هذا قريب من مفهوم الكسريات التى تـم عرضها فى الباب الثالث. من أفضل الأمثلة على ذلك هو قياس طول شواطئ النرويج والذى يتميز بوجود خلجان تتفرع إلى خلجان أصغر والتى تتفرع بدورها إلى خلجان أصغر وأصغر وهكذا.



شكل (٥-١٢) يتم تقدير طول شواطئ النرويج باستخدام مربعات كما هو مبين. كلما صغرت هذه المربعات - كلما زاد طول الشواطئ. عند رسم هذه العلاقة بمقياس لوغاريتمى نحصل على خط مستقيم ميله ١,٥٢ ، أى بين الوحدة التى تمثل خطا مستقيما واثنين والتى تمثل مستوى.

بصرف النظر عن مقدار الأس، فإننا نحصل على علاقة أُسّية مثل قانون ريختر – جوتنبرج. سمة هامة لهذه العلاقات الأسية أنها لاتعتمد على مقياس الرسم أو حتى المسبب الفيزيائى لحدوثها. فى حالة الزلازل لا نتعرض للأسباب التى تؤدى إلى زلزال قوى أو آخر ضعيف. جانب مهم هنا أن العلاقة الأسية لا تعنى بالضرورة أنها تستبعد حدوث زلزالين قويين متقاربين فى الزمن، وإنما نتحدث هنا فقط عن التكرارية.



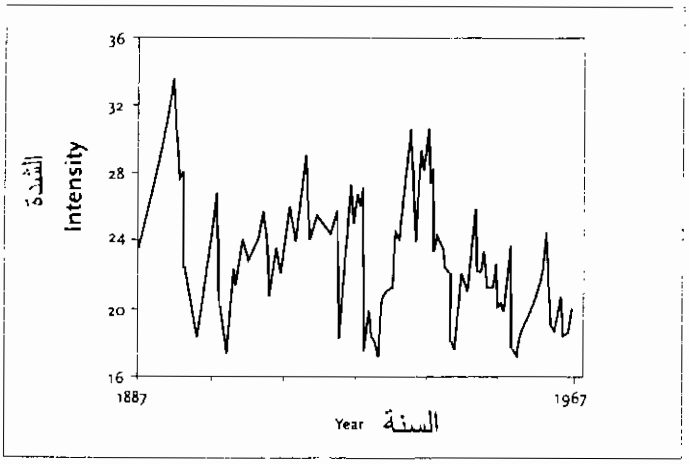
شكل (٥-٢ب): يبين الشكل طول شواطئ النرويج مع مساحة المربعات بمقياس رسم لوغاريتمى.

سمة خاصة هامة وعامة لكل القوانين الأسية، وهى أنها لا تعتمد على مقياس الرسم، هناك مثال رائع لهذا حيث حاول مارك بوكانان تطبيق هذه الفكرة فيما أسماه «بالعلم الحقيقى للتاريخ». لنتصور أنه فى تجربة ما لدراسة نتيجة قذف حبات بطاطس مجمدة عرض حائط متين فسوف تتحطم هذه الحبات إلى شظايا ذات أحجام مختلفة، مثلها مثل أى صخور تتصادم وتتحول إلى شظايا ذات أحجام مختلفة، كما يحدث عند تصادم صخور فى الفضاء لتكون كويكبات صغيرة مثل تلك التى تسبح حول الشمس فى حزام يقع بين المريخ والمشترى.

تتحطم حبات البطاطس إلى عدد كبير من القطع الصغيرة، وقليل من القطع الكبيرة وما بينها، يمكن أن نصنف هذه القطع إلى مجموعات حسب وزنها كما صنف ريختر وجوتنبرج الزلازل حسب شدتها. إذا نحينا جانبا القطع الصغيرة جدا ورسمنا علاقة بين عدد القطع فى كل صنف مع وزنها نحصل على قانون أسّى. لنأخذ الآن القطع الصغيرة جدا ونأخذ ميزانا حساسا ونصنّف هذه القطع حسب وزنها ونكرر الخطوة السابقة، نحصل مرة أخرى على قانون أسّى . لقد أجريت هذه التجربة فى جامعة جنوب الدانمرك فى عام ١٩٩٠م ووجد الباحثون أن هذا الاستنتاج صحيح بالنسبة لقطع البطاطس التى يتراوح وزنها بين عشرة جرامات إلى

واحد فى الألف من الجرام. إذا زحفت نملة بين الشظايا فسوف تشاهد تضاريس قطع البطاطس مثلها بالضبط مثل خنفساء تزحف بين الشظايا، إن التضاريس هى هى بصرف النظر عن مقياس الرسم. نفس الشىء ينطبق على تضاريس سطح القمر، تبدو واحدة بصرف النظر عن مقياس الرسم، حيث أن الحفر على سطح القمر تنتج عن تصادم الكويكبات بهذا السطح وبنفس الطريقة التى تتكسر بها حبات البطاطس. هنا يمكننا القول بأن كل هذه الأنماط من التباينات متماثلة حيث تكون التباينات الكبيرة أكثر ندرة. يمكن أن نعبر عن ذلك إذا اعتبرنا أن تكرارية الحدث تساوى الوحدة مقسومة على حجم الحدث مرفوعا إلى أس ما، والعكس صحيح أى أن حجم الحدث يتناسب مع الوحدة مقسوما على تكراريته مرفوعة لأس ما.

يطلق على مثل هه العلاقة اسم «ضوضاء (1/f)» "1/f noise" حيث ترمز f للتكرارية. وهنا نقول إن المسميين «القانون الأسى» وضوضاء (1/f)» مترادفان.



شكل (٥-٣) : تغيرات الوهج الصادر عن النجوم الساطعة المسماة «بالكوازارات» "quasars" فى الفترة من ١٧٨٨ - ١٩٦٧م).

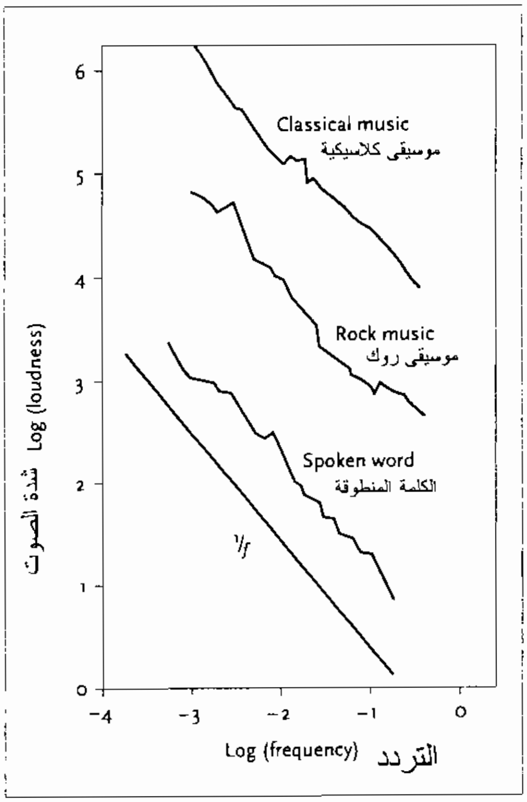
نلاحظ كما هو مبين فى شكل (٥-٣) أن التغيرات فى وهج الكوازارات يحوى تلألؤا سريعا وتذبذبات بطيئة تتراكب أحداها على الأخرى.

إذا رسمنا وهج مثل هذا النجم كدالة من الزمن نحصل على شكل قريب من شكل تضاريس جبل يبين ارتفاع وانخفاض أجزائه المختلفة، هذه مرة أخرى ما يسمى «بالضوضاء (f/1)». مثل هذه الضوضاء تسمى بالضوضاء البيضاء وهى عشوائية تماما. يمثل هذا طرف من النقيضين - حيث على الطرف الآخر إذا كانت الضوضاء تحوى ترددا واحدا مثل صوت موسيقى ذى تردد واحد ممل تماما، إذ إنه ذو وتيرة واحدة، أما الضوضاء (f/1) أحيانا تسمى بالضوضاء ذات اللون الوردى

(Pink noise) لا تبدو مملة للأذن البشرية. باختصار فالضوضاء (f/1) تحمل معلومات.

لابد من التحذير من الإفراط فى استخدام مثل هذه العلاقة وتطبيقها فى كل الأحوال، فمثلا ارتفاع درجة حرارة الأرض المضطرد لا يتناقض مع تذبذبات درجة الحرارة على الكرة الأرضية، ولكنه يتراكب على منحنيات التذبذب هذه . إن معدل الارتفاع المضطرد فى درجة الحرارة المتزايد خلال القرن ونصف القرن الماضيين يتوافق تماما مع معدل ازدياد النشاط الإنسانى الذى يؤدى إلى انطلاق غازات الاحتباس الحرارى فى طبقة الغلاف الجوى.

خلاصة القول إنه رغم وجود ضوضاء عالية فى نظام الطقس [ضوضاء (f/1)] إلا أن هذا لا ينفى الارتفاع المضطرد فى درجة الحرارة



شكل (٥-٤) : إذا استخدمنا مقياس الرسم اللوغاريتمى نرى أن الموسيقى الكلاسيكية، موسيقى الروك والتخاطب البشرى تظهر كلها كأشكال «ضوضاء f/1» لأنها كلها تحوى معلومات.

ثمة جانب مهم فى هذا الموضوع هو أنه بالخبرة والتجربة التاريخية، تقوم

شركات التأمين بتقدير مدى تكرارية الكوارث فى منطقة ما، وبناء على المعلومات التاريخية المتوفرة يمكن أن تقدر بشكل دقيق إلى حد ما مدى هذه التكرارية (هو فى الواقع تخمين)، لذا لابد من النظر إلى سلسلة الأحداث على مدى فترة طويلة حتى يمكن الحكم بشكل مقبول على الأحداث المستقبلية المتوقعة.

هناك أيضا حالتان لابد من أن نعرضهما باقتضاب قبل الانتقال إلى موضوع ظهور الحياة فى الكون: فى الأربعينيات من القرن الماضى قام جورج زيبف (George Zipf) – من جامعة هارفارد – بدراسة سكان المدن فى العالم. من البديهى أنه توجد مدن قليلة يسكنها عدد هائل من السكان، ومدن أكثر بكثير يقطنها عدد قليل من السكان إذا رسمنا عدد المدن مقابل عدد السكان على مقياس رسم لوغاريتمى نحصل على خط مستقيم، مما يعنى أن العلاقة تخضع لقانون أُسّى، ومن المهم أن هذه الصورة صحيحة الآن أيضا وليس فقط فى الأربعينيات من القرن الماضى. كل هذا رغم أن كل شخص يختار المدينة التى يقطنها بقرار فردى بحت، مما يعنى أن عمليات الاختيار لكل هؤلاء السكان ليست مرتبطة بعضها بالبعض، أو عشوائية إلى حد كبير.

ثمة ظاهرة أخرى طريفة وهى ظاهرة حدوث الاختناقات المرورية حتى على الطرق السريعة، لقد درس الباحثون من جامعة دويسبرج (University of Does-berg) هذه الظاهرة ووضعوا نموذجا رياضيا لذلك. رغم بساطة النموذج المستخدم ولكنه أظهر بوضوح وجود علاقة أُسّية بين حجم الاختناقات (عدد السيارات فى كل اختناق) وعدد كل منها، وكان من الواضح أيضا وجود «الضوضاء (f/1)».

من الدروس المستفادة المهمة أنه لا يلزم لكى يحدث اختناق أن يحدث تصادم. درس آخر مهم جدا وهو أنه إذا التزم كل سائق بالسرعة القصوى سوف «تذوب» كل الاختناقات، ووصول كل شخص إلى وجهته فى زمن أقل مما حاول كل شخص أن يقود سيارته بسرعة أكبر.

قام بنوا ماندلبروت بدراسة تذبذبات أسعار بعض السلع، مثل الحديد والقطن فى بورصة نيويورك ووجد أن هذه التذبذبات فى الأسعار تمثل أيضا «ضوضاء (f/1)» ، مما يعنى أن الاقتصاد يتبع نفس القانون الذى تتبع له الزلازل والاختناقات المرورية، كما أن الكوارث الكبيرة مثل كارثة أكتوبر ١٩٧٨م يمكن أن تحدث نتيجة بدايات ضعيفة جدا. أقلق هذا الاقتصاديين، حيث إنهم يؤمنون أن الدولة يمكن أن تمنع مثل هذه الكوارث عن طريق التحكم فى سعر الفائدة، ولكن طالما أن تذبذبات الأسعار تتبع قانونا أسّيا، يمكن أن تؤدى تغيرات طفيفة فى سعر الفائدة إلى تأرجحات عالية جدا فى السوق، وإن كان ذلك نادر الحدوث.

لقد جذب ذلك انتباه «بريان آرثر» Brian Arthur وهو آيرلندى الأصل وعمل فى النمسا ثم فى أمريكا فى الثمانينيات من القرن الماضى، ووجد أن الاقتصاد يتبع قوانين قريبة من قوانين الديناميكا الحرارية قرب الاتزانية . من المفاهيم الأساسية فى هذا الموضوع هو مفهوم «انخفاض العائدات». ببساطة إذا اخترع شخص شيئاً ما وباع منه عددا كبيرا، فإنه مع الوقت أصبح منتشرا ويقل الطلب عليه، وبالتالى يقل العائد منه ويصعب تسويقه. كذلك توصل آرثر إلى مفهوم «ارتفاع العائدات» فإذا أمكن السيطرة على السوق بشكل ما، فلن يكون أمام المستهلك سوى شراء هذا المنتج حتى وإن لم يكن الأفضل، وأفضل مثل لذلك «بل جيتس» الشهير،صاحب شركة ميكروسوفت. يمكن أن نذكر أيضا أن شركة «آبل» وإن كانت تنتج منتجات أفضل، لكن كان تسويقها فى البداية غير ناجح مقارنة بنجاح شركة ميكروسوفت، المهم هو أن الاقتصاد أصبح أقرب إلى الديناميكا الحرارية اللاإتزانية منها إلى الديناميكا الحرارية الكلاسيكية.

لنعد إلى الماضى – إلى موت الديناصورات الذى حدث قبل ٦٥ مليون سنة، والذى يمثل علاقة انتهاء العصر الطباشيرى وبداية العصر الثلثى. إن موت الديناصورات كان مصاحبا لفناء ٧٠٪ من كل أنواع الكائنات الحية على الأرض، حيث إن هذا حدث على مدى عدة آلاف من السنين، فهو يمثل علامة فارقة فى العمر الجيولوجى على الأرض.

السؤال المنطقى هو لماذا حدث هذا، وهل يمكن أن يحدث مرة أخرى ومتى؟ هناك دلائل على أن هذا حدث نتيجة اصطدام نيزك بالأرض.

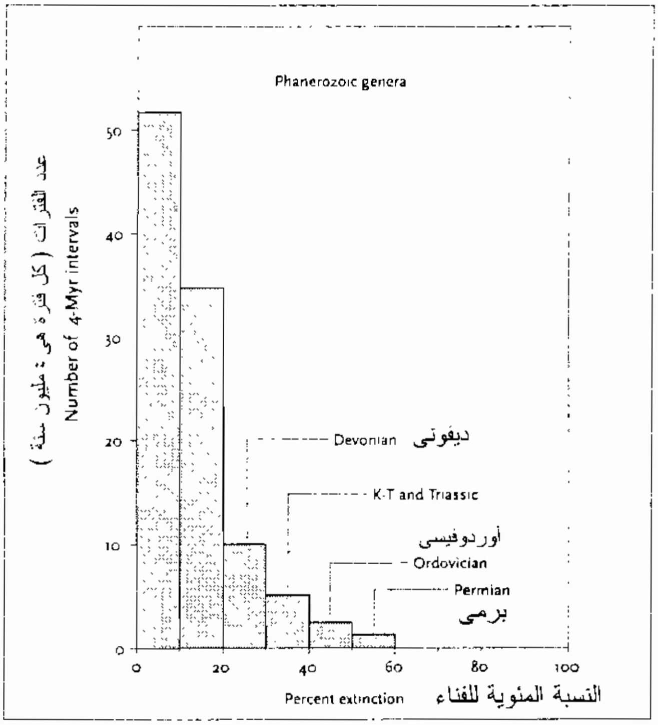
يمكن تفسير ذلك بأن الانفجار الذى حدث يكافئ انفجار بليون ميجاطن من الـ ت. ن. ت (TNT) مما أدى إلى تناثر شظايا دخلت الغلاف الجوى ورفعت درجة حرارة الغلاف كله بمعدل ١٠ كيلوات لكل متر مربع من سطح الأرض لعدة ساعات – صاحب كل هذا كمية هائلة من الغبار كما وصفها جاى ميلوش "Jay Melosh" من جامعة أريزونا، صاحبها دخان من كل الحرائق التى اشتعلت على الأرض لتحجب أشعة الشمس فتموت النباتات، وأدى كل ذلك لصقيع ساد الكرة الأرضية لفترة من الأرض، يضاف إلى هذا أنه منذ ٣٥ مليون عام ضربت الأرض مرة أخرى من الفضاء ولكن بشكل أخف. يقول البعض إن الديناصورات عانت عدة موجات من الانتشار والانحسار خلال المائة وخمسين مليون عام التى جابت فيها الكرة الأرضية، وربما يكون الانفجار الهائل الذى حدث منذ ٦٥ مليون سنة هو القشة التى قصمت ظهر البعير، وربما كانت الحياة على الأرض فى ذلك الوقت تعانى من ظروف سيئة نتيجة تغير مناخى مرتبط بتكون القارات. هنا أيضا لابد أن

نشير إلى أن حادثة الانفجار، والتى يشار إليها بالرمز (T - k) لم تكن وحدها وإنما يشير الجيولوجيون إلى أحداث خمسة وتسمى «بالخمسة الكبيرة» - حدثت كلها خلال الستمائة مليون سنة الأخيرة. فى بداية عصر الكمبرى (Camberian) ظهرت المخلوقات متعددة الخلايا، ثم ظهرت الكائنات الحية وتعددت صور الحياة على الأرض.

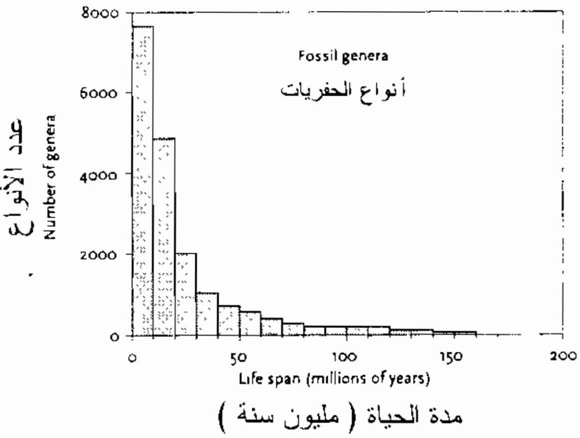
إذا استعرضنا هــذه الأحداث الخمسة والتى حدثت منذ ٤٤٠ مليون سنة (وهى الفترة بين العصر الأوردفيشى "Ordivician" والعصر السيلورى (Silurian) ، ٣٦٠ مليـون سنة (بين العصر الديفونى (Devonian)، والعصر الكربونى أو الفحمى (Carboniferrus) ، منذ ٢٥٠ مليون سنة مضت بين العصر البيرمى (Permian) والعصر الترياسى (Triassic) ، ومنذ ٢١٥ مليون سنة وهى حد العصر الترياسى - الجوراسى (Triassic - Jurassic) ، ومنذ ٦٥ مليون عام (عند الحادثة (K - T) . هـناك أيضا عدة أحداث فناء تكون ما يسمى بالتقويم الجيولوجى. أكبر هذه الأحداث تلك التى حدثت منذ ٢٥٠ مليون سنة فى نهاية العصر البرمى. لقد أفنت هذه الحادثة ٨٠٪ وربما ٩٥٪ من أنواع الكائنات الحية على الأرض وفى المحيطات، وتم ذلك فى غضون عشرة آلاف عام، وهنا يمكن القول بأن ثلث أنواع الكائنات الحية قد انقرضت من على ظهر البسيطة. هنا يمكن أن يثار السؤال: هل هــذه الأحداث المفنية لا تعتمد أيضاً على مقياس الرسم؟ الإجابة الصادقة هى أننا لا نعلم بحق.

قام العالم جاك سيبكوسكى "Jack Sepkoski" - من جامعة شيكاغو - بجمع قاعدة بيانات عن عمليات الفناء هذه من كل المصادر المنشورة، مع التركيز على الثدييات البحرية، وبعد كل هذا الجهد الخارق استطاع سيبكوسكى رسم العلاقة بين أحداث الفناء فى مراحل يبلغ مداها ٤ مليـون سنة، وكيف تذبذبت عبر الستمائة عام الماضية.

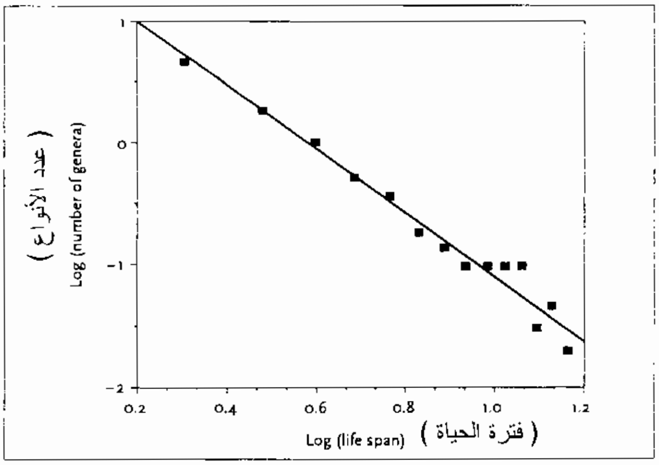
فى شكل (٥-٥) المأخوذ من مقالة نشرها سيبكوسكى فى عام ١٩٩٣ نرى أن النســب المئوية لا تتوافــق مـع النسب التـى أوردناها، لأنهـا تتعـلق بفصـائل وليـس لأنواع، وخاصة أنها تتعلق بفصائل الثدييات البحرية فقط وليس لكل أنواع الحيـاة علـى الأرض، ولكن التـوافق مـازال جيـدا، حيث إنه يظهـر أن «فناء الديناصورات» هو أيضا فناء الثدييات البحرية. ولكن كل هذا يثير سؤالا: أى نوع من العشوائية هــذا؟ وهل هناك عشوائية فى هذا أصـلا؟ ولكنهـا ومرة أخرى «الضوضاء (f/1)».



شكل (٥-٥) : شكل بيانى يبين عدد المراحل (كل مرحلة هى ٤ مليون سنة) ونسبة الفناء التى حدثت فى كل مرحلة.



شكل (٥-١٦) يبين شكل (٥-١٦) العلاقة بين الأجناس التى لم تقن لفترة حياة معينة مبينة على شكل أعمدة



شكل (٥-٦ب): ، يبين الشكل نفس العلاقة ولكن على شكل بيانى لوغاريتمى، مما يوضح أن أعمار حياة الأجناس تتبع قانونا أسيًا بأس تقترب قيمته من اثنين.

قام دافيد راوب (David Raup) - أيضا من جامعة شيكاغو - بمعالجة البيانات التى جمعها سيبكوسكى، بحيث يجمع كل ٤ مليون مرحلة انقرضت خلالها عشرة بالمائة من الأجناس، تلك التى انقرضت بها ما بين عشرة وعشرين بالمائة من الأجناس وهكذا، وكما نرى فإن هذه العلاقة تخضع أيضًا لقانون أُسّى. توصل مايكل بولتر (Michael Boulter) وزملاؤه فى جامعة شرق لندن إلى نفس النتيجة عند تحليل نتائج قاعدة بيانات أكبر خاصة بالحفريات.

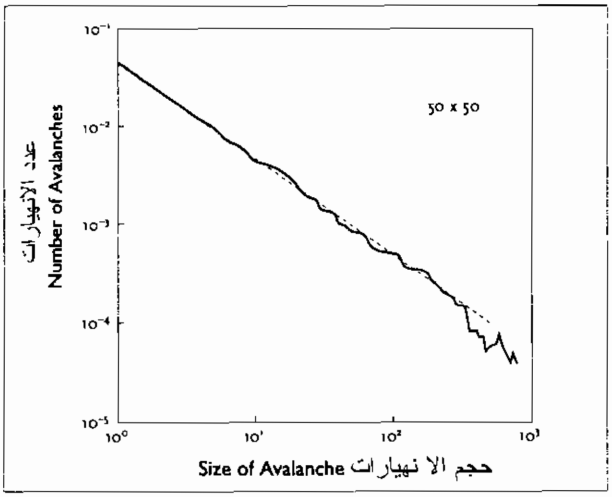
كما نرى فإن عمليات الفناء على الأرض ليست كلها قادمة من الفضاء، ولكنها عمليات تحدث فى أى وقت وعلى أى مستوى، يبدأ بعضها بتصادم النيازك، وأخرى بسبب العصور الجليدية، ولكن مما رأيناه فنحن لا نحتاج دائما إلى دفعة قوية لبدء حدث كبير الأبعاد، أى أن فناءً على أى مستوى يمكن أن ينتج عن حدث بادئ من أى مستوى، باختصار فنحن نتعامل هنا مع منظومة معقدة - وهى الحياة على الأرض - لها خاصية تنظيم نفسها بنفسها، تعتمد على سريان الطاقة، وتتواجد هذه المنظومة عند حد الشواش. باستخدام المنطق العلمى نحاول استبعاد كل الأمور الجانبية ونركز على لب الموضوع.

فى عام ١٩٨٠م بدأ الفيزيائى الدانمركى المولد بير باك (Per Bak) - والذى عمل فى مختبر بروكهافن الوطنى فى نيويورك - اهتمامه بدراسة سلوك النظم عندما تكون عند حد الشواشى، توصل باك إلى أن مثل هذه النظم لابد وأن تكون مفتوحة أى تتلقى طاقة من خارجها وتصل إلى حالة قرب حدود الشواش تسمى بحالة

«التنظيم الذاتي الحرج»، امتد اهتمام باك ليشمل الزلازل وأحجام سكان المدن، وتوصل باك مع زميليه تشاو تانج (Chao Tang) وكورت ڤيزنفلد (Kurt Wiesen feld) إلى نموذج مشهور، الآن يسمى بنموذج «كومة الرمل» إن كومة على منضدة الرمل هذه ليست في اتزان وعندما نصب عليها رملا نجد أن ارتفاع الكومة يزداد إلى حد معين ثم يبدأ الرمل في الانهيار ويقل ارتفاعها، وهكذا حتى يغطي كل المنضدة ثم يبدأ في التسرب من أطرافها. هنا نرى أنه عند إضافة حبة رمل واحدة يمكن أن يحدث انهيار، أو تبقى الكومة متماسكة ولكنها تظل دائما قريبة من الوضع الحرج، وهكذا...

ربط باك وتانج بين ما يحدث لكومة الرمل وميكانيكية الزلازل وفرضا برنامجا حاسوبيا لنمذجة ما يحدث أثناء الزلازل عندما تنزلق شريحة من القشرة الأرضية فوق شريحة أخرى ويتولد إجهاد كبير يحرر كمية كبيرة من الطاقة ثم تنزلق مرة أخرى وتتولد كمية أخرى من الطاقة وهكذا. في نموذج «باك» و«تانج» تتحرر كمية من الطاقة ليست كافية لزوال الإجهاد وإنما تكفي فقط لجعل النظام قرب الحالة الحرجة مرة أخرى. يفسر ذلك كون الزلازل تتبع قانونا أُسّيًا.

لقد أضاف برنامج باك وتانج خصائص حبيبات الرمل من حيث تكورها والتصاقها وهكذا .. لقد أورد باك في كتابه «كيف تعمل الطبيعة» كيف يمكن باستخدام مكعبات لعب الأطفال رؤية أعماق سلوك النظم غير الإتزانية بما فيها النظم البيولوجية، في كل الأحوال نحصل على العلاقة الأسّية التي ورد ذكرها.



شكل (٥-٧): يبين الشكل عدد الانهيارات متباينة الحجم التي تحدث في كومة الرمل في مقياس رسم لوغاريتمي وتوضح أنها أيضا تخضع لقانون أسّي.

وُجد بعد ذلك أنه ونظرا لأن حبيبات الرمل ذات قصور ذاتى عالٍ فإنه يصعب الحكم على الانهيارات الصغيرة. لذا تم الانتقال إلى أكوام من حبات الأرز الطويلة؛ لأن حبات الأرز الطويلة ذات احتكاك أعلى، مما يسمح بأن تتكوم طبقات فى أكوام أعلى لتحدث انهيارات تدريجية تسمح بمتابعة الانهيارات بشكل أفضل.

أجرى التجارب هــذه باستخدام حبات الأرز لأول مــرة ڤيدار فريتل (Vidart Fretle) وزملاؤه فى جامعة أوسلوه. أجريت هذه التجارب بشكل مبسط حيث وضعت حبات الأرز بين لوحين زجاجيين شفافين مما جعل التجربة ذات بعدين فقط وتم تصوير هذه التجارب باستخدام كاميرا فيديو. أضاف فريق البحث إضافة هامة لهذه التجربة بتلوين حبات الأرز التى تلقى من أعلى الكومة، ولوحظ أن الحبة الملونة لا تنزلق مباشرة فوق سطح الكومة وإنما يمكن أن تختلط ببقية الحبات ثم تظهر مؤخرا فى مرحلة لاحقة. من هذه التجربة البسيطة نرى أنه فى حالة الأوضاع الحرجة فإن كل حدث صغير يؤثر على كل مكونات المنظومة، أى أنه لا يوجد مكون واحد لا يشارك فى سلوك المنظومة، أى أنه لا يبقى مكون واحد ساكنا لا يفعل شيئًا.

إن فكرة تلوين حبات أرز معينة أضافت الكثير من الحيوية على البرنامج الحاسوبى الخاص بكومة الرمل، حيث أظهرت الكثير من تفاصيل سلوك مثل هذه النظم، فمثلا عندما تتكون الكومة من حبات رمل خضراء منثورة على المنضدة، ومع ارتفاع الكومة تبدأ الحبيبات الحمراء فى التجمع مكونة خيطا ليتحرك عبر سطح الرمل مثل الشبكة. لوحظ أنه طالما كانت حبات الرمل الحمراء متباعدة فإن إلقاء حبة رمل فوق قمة الكومة تتسبب فى تغيرات طفيفة فى أوضاع حبات الرمل الحمراء الأخرى، ولكن عندما تزداد كثافة الحبات الحمراء فإن إلقاء حبة واحدة على قمة الكومة تتسبب فى انهيارات كبيرة. ثمة سمة أخرى فى غاية الأهمية وهى أنه حتى عندما تحدث انهيارات كبيرة تكون كثافة الشبكة كبيرة.

بهذا نكون جاهزين للخطوة التالية وهى الرؤية المتمعنة لكيفية ظهور الحياة. حيث إننا توصلنا إلى الأسس البسيطة التى تنشأ عنها ظواهر معقدة مثل الزلازل، البورصات، وحركة التجمعات السكنية نجد أن كل هذا مبنى على الشبكات والوصلات البينية بين أجزائها والتى تبدو فى النهاية نظما معقدة؟ كان ستيوارت كاوفمان (Stuart Kawfman) فى معهد سنتا فى نيو مكسيكو أول من تنبه لعلاقة هذه الشبكات بظهور الحياة .

لنتصور أننا أخذنا عددا كبيرا من الأزرار، ليكن مثلا عشرة آلاف ووضعناها على أرض حجرة، لنبدأ عشوائيا بقطعة من الخيط ونربط زرين ثم زرين آخرين ثم آخرين وهكذا. يمكن أن يحدث أن يكون أحد الزرين عند أى لحظة قد تم ربطه بآخر، وهكذا نحصل على شبكة من ثلاثة أزرار وربما أربعة أو أكثر . بهذا نحصل على شبكة ذات بنية معينة من هذه الأزرار.

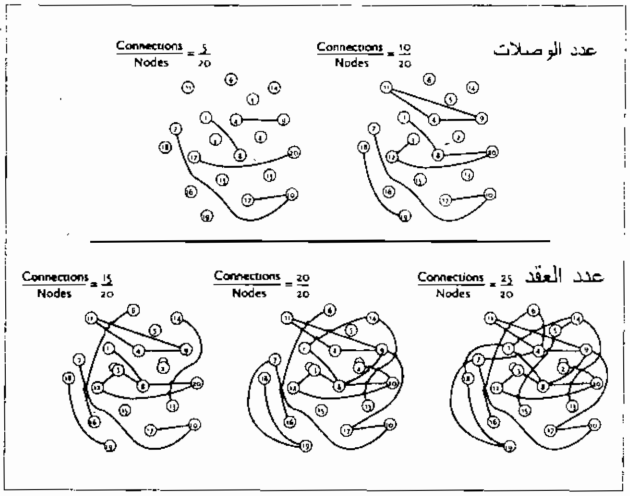
كل مجموعة من الأزرار موصلة بعضها بالأخر تسمى مكون من مكونات الشبكة، وتمثل الأزرار فى مثل هذه الشبكة العقد (nodes) والتى ترتبط بها الوصلات، فكلما ازداد عدد الخيوط يزداد عدد الأزرار المرتبطة بعضها بالبعض الآخر لتكون عنقودا من الروابط، ويمثل هذا العنقود أكبر مكون فى الشبكة. عندما يصل عدد الخيوط إلى النصف أو أكثر ، يكبر حجم أكبر عنقود بشكل سريع (قانون أسّى) بسرعة يتكون فوق عنقود (supercluster) وهى الشبكة التى أصبح الجزء الأعظم من مكوناتها مرتبطا أحدها بالآخر. بعد ذلك ينخفض معدل النمو نظرا لقلة الأزرار التى بقيت غير مرتبطة، ولكن فى النهاية أصبح عندنا منظومة معقدة. هذه المنظومة لن تتغير كثيرا باضافة عدة قطع من الخيط – أى أن المنظومة وصلت إلى حالة من الثبات ولكنها مختلفة تماما عن حالة الأزرار المنفردة . شبه كاوفمان هذا التحول بتحول الحالة عندما يتجمد الماء ويتحول إلى جليد.

ليس بالضرورة أن تكون الوصلات هنا قطعا من الخيط، وإنما يمكن أن تكون – كما هو الحال بالنسبة لكومة الرمل – قوة الجاذبية، عندما تكون زاوية انحدار الكومة حرجة، عند إزالة حبيبة رمل واحدة يحدث انهيار للكومة، مثله فى ذلك مثل إزالة الحجر الرئيسى فى قوس بناء جسر، يتسبب ذلك فى انهيار المنشأة كلها.

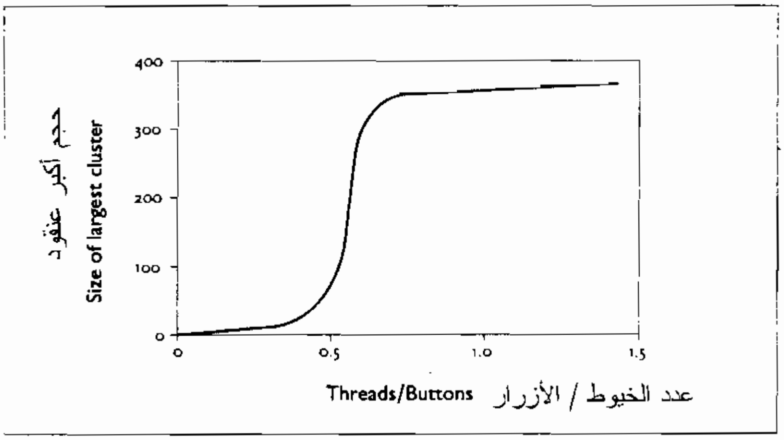
يمكن أن نورد مثالا لذلك وهو حركة كويكيب مثل تلك التى تسبح بين زحل والمشترى، حيث أن كل كويكب مرتبط مع كل جسم فى الكون بقوة الجذب العام ولذا تصبح كل هذه الارتباطات مثل وصلات شبكة، وبالتالى يسهل فهم لماذا يستحيل توقع سلوك أى كويكب على حدة.

كان جل اهتمام كاوفمان يتركز فى دراسة كيفية ظهور الحياة من اللاحياة. لقد درس فى البداية الفلسفة – فى كلية دارتموت فى نيوهامبشير، ثم فى جامعة أكسفورد بإنجلترا – ، ولكن كان هناك قدر كبير من الدراسة فى علوم الحياة تتعلق بكيفية الربط بين الصور التى نحملها فى رءوسنا وعمل الأعصاب والعيون فى ترجمة المعلومات التى تتدفق من العالم الخارجى. بعد ذلك انتقل كاوفمان إلى

دراسة الطب وعمل كطبيب فى مستشفى جامعة كاليفورنيا فى سان فرانسيسكو. وهكذا أصبح كاوفمان عالما فى البيولوجيا النظرية . انتقل بعد ذلك إلى معهد سانتا فى (santa Fe) حيث كان الاهتمام بالشواش، والتعقيد، والتنظيم الذاتى الحرج محور البحث بين العاملين فى هذا المعهد.



شكل (٥-٨أ) : نموذج كاوفمان للأزرار التى تمثل شبكة.



شكل (٥-٨ب) : بازدياد عدد الوصلات يحدث تحول حاد من حالة الأزرار المنفردة وعدد صغير من الوصلات إلى حالة يكون فيها تقريبا كل زر متصلا بالشبكة.

وضع كاوفمان تصورا أن تفاعلات كيميائية مثل تلك التى توصل إليها بيلاأوسف وچابوتينسكى (انظر صفحة ٧٤) تتم وحسب سلوك الشبكة التى تم وصفها فى الصفحات السابقة. تزايد الوصلات بين العقد يشابه تزايد التفاعلات بين المواد الكيميائية التى مع وجود المحفزات والمثبطات تؤدى إلى تحول حالة حاد – أى ظهور الحياة.

لا توجد حالة بينية، أى نصف حياة ونصف لا حياة ، إما حياة أو لا حياة. توجـــد تصورات أخرى عن بداية الحياة، ولكنها كلها غير مقنعة مثلها مثـــل نموذج كاوفمان، ولكن ما يهمنا الآن هو كيف تتواصل الحياة طالما ظهرت، وما مدى صحة الأفكار التى أوردناها مثل التنظيم الذاتى الحرج، والشبكات، والوصلات، وهكذا..؟

أصبح اهتمام كاوفمان مركزا حول كيفية عمل الخلية وكيف أن هذا التعقيد الذى يبدو لنا، يمكن أن يكون مبنيا على قواعد بسيطة. إن التعليمات محفوظة فى الحامض النووى (DNA) والذى تتكون منه الجينات نفسها، ولكن البنية الفعلية والميكانيكية المرتبطة بذلك تتكون من البروتينات، وتتكون البروتينات من الأحماض الأمينية؛ ولذلك فاكتشاف وجود الأحماض الأمينية فى السحب الكونية التى تكونت منها الشمس والكواكب نفسها شيء يثير الاهتمام بشكل كبير. إن الشفرة الموجودة فى الدنا (DNA) تحكم عملية تكون البروتينات، وهذه البروتينات تحمل الحياة بعد ذلك. عندما ينشط چين (كيف ومتى يحدث ذلك خارج نطاق هذا الكتاب) تنطبع نسخة من التعليمات فى حامض الريبوز النووى «رنا» (RNA) مشابه الدنا. تقرأ الخلية هذه التعليمات من جزىء الرنا ثم تبدأ فى تكوين البروتين. هذه العملية المكونة من خطوتين ربما تدلنا على كيفية بدء الحياة وربما كان جزىء «الرنا» يسبق تكون جزىء «الدنا».

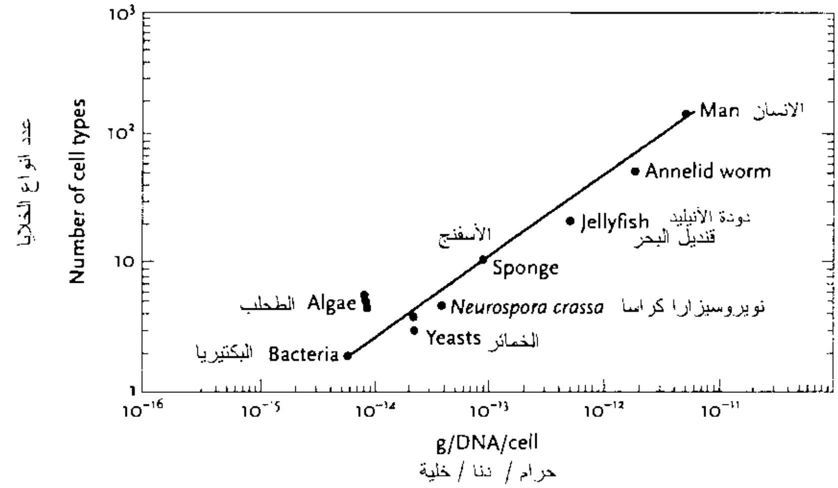
النقطة الأساسية فى تصور كاوفمان هى أن الچينات تتحكم فى عمل الخلية، كما تؤثر الجينات بعضها على البعض. يعود اهتمام كاوفمان بالعلاقة بين ميكانيكية عمل الخلية وسلوك الشبكات إلى فترة دراسته للطب، ولكن لم تتبلور هذه النظرة إلا فى الثمانينيات من القرن الماضى فى معهد سانتافى، فى ذلك الوقت كان الحديث أن هناك مائة ألف چين يتكون منها الجينوم البشرى، الآن أثبت مشروع الجينوم البشرى أن هناك فقط ثلث هذا العدد الذى يشكل جسم الإنسان. يوجد هذا العدد من الجينات فى كل خلية من خلايا الجسم البشرى، ولكن ليست كلها نشطة فى

نفس الوقت، ويتخصص كل جين فى وظيفة معينة، ويتم ذلك خلال نمو الجنين. هذا الموضوع هو الشغل الشاغل لعلماء البيولوجيا فى الوقت الحالى. بأى حال، يوجد فى جسم الإنسان ٢٥٦ نوع من الخلايا المتخصصة، ويظل هذا التخصص ثابتا طوال الحياة، فخلايا الكبد تظل خلايا كبد طوال حياة الإنسان، لكن كل المعلومات المحفوظة فى الجين تظل موجودة كما هى، بدليل أن الاستنساخ يفضى إلى مخلوق نسخة مطابقة للكائن المستنسخ.

يمكن أن نشبه العلاقات بين الجينات مثل الخيوط بين الأزرار فى النموذج الذى سبق ذكره أو العقد فى الشبكات كما رأينا. شبّه كاوفمان عمل الجينات بشبكة ضخمة من المصابيح الكهربية موصلة بشكل عشوائى، يمكن أن يحدث أن تكون كل المصابيح مضاءة أو تكون كلها منطفئة. بين هذا وذاك يمكن أن يحدث عدد هائل من الحالات التى تكون فيها مجموعات مختلفة من المصابيح مضيئة أو منطفئة . عدد هذه الحالات هو (2^n) حالة. إذا كان هناك مائة مصباح تكون هناك (٢^١٠٠) حالة ممكنة، وهذا عدد كبير جدا جدا إذا قارناه حتى بعمر الكون بالثانية الذى يبلغ ١٠^١٧ – فى حين عدد الحالات هو (١٠^٣٠) والذى يزيد بعشرة آلاف بليون مرة.

مع كل هذا بدأ كاوفمان فى تنفيذ برنامج حاسوبى لعدد بسيط من المصابيح، ومع هذا استغرق هذا العمل عددا من السنوات لاستكماله.

كان الهدف الرئيسى للفريق هو التوصل إلى الأوضاع المستقرة المبنية على قواعد بسيطة، وكانت النتيجة التى توصل إليها الباحثون أنه توجد حالات مستقرة ودورات استقرار، يستقر عندها النظام ويتجه إلى إحداها مهما كانت البداية، ربما يكون هذا هو شكل ظهور الحياة فى الخلية، وجد الباحثون أنه عندما يكون كل مصباح مرتبطا بعقدة واحدة لا يحدث شىء مثير، وإذا كان لكل مصباح عقدتان فإن الشواشى يغلب على سلوك الشبكة، ويكون النظام حساسا بدرجة أن فتح أو إغلاق أحد المصابيح يجعل الشبكة تنتقل من وضع مستقر إلى آخر مثل ظاهرة الفراشة. قرب حافة الشواش تحدث أشياء ذات مغزى – حيث تكون دورة الحالة مساوية للجذر التربيعى لعدد العقد. فى حالة وجود مائة عقدة يبلغ عدد هذه الحالات عشر فقط. عندما يبلغ عدد العقد مائة ألف، يوجد فقط ٣٢٧ حالة جاذبة مستقرة لا تتأثر بالمؤثرات البسيطة. إذا كان عدد العقد ثلاثين ألفا يكون عدد الحالات المستقرة ١١٧ حالة فقط



شكل (٥–٩) : يبين الشكل مقدار جزيئات الدنا فى الخلية مع عدد الخلايا فى كائنات مختلفة بمقياس رسم لوغاريتمى.

للتحقق من هذا قام كاوفمان بمقارنة عدد الجينات وعدد الخلايا المتخصصة فى كائنات حية مختلفة. وكما هو مبين فى شكل (٥–٩) يقترب المنحنى من العلاقة الخطية (خط مستقيم بأس يساوى النصف).

مازال البحث جاريا و ما زال أمامنا اجراء العديد من التجارب لاختبار هذه الأفكار والفرضيات التى تحاول فهم التطور والتنوع. من كل ذلك واضح أن المخلوقات مهما كانت معقدة التركيب مثل الإنسان والذى يمثل أعقد بنية فى هذا الكون – يتكون حسب قواعد بسيطة جدا.

لذا تنخفض أعداد التفاعلات المحتملة بين آلاف العناصر فى الخلايا إلى عدد بسيط من الحالات الممكنة، ويصيغ كاوفمان ذلك على الصورة التالية: «نحن تعبير طبيعى عن انتظام أعمق» . لننتقل الآن إلى بحث كيف يؤثر هذا الانتظام الأعمق على التفاعلات بين الكائنات الحية وليس فقط بين الجينات والمواد الكيميائية.

الباب السادس

حقائق الحياة

إن التطور حقيقة واقعة مثله مثل المدار الإهليلجى للكواكب حول الشمس. هناك تحولات بين الأنواع واضحة فى الحفائر وفى الحياة المعاصرة بنفس القدر. لقد توصل تشارلز دارون وألفريد راسل والاس كل على حدة إلى نظرية التطور(*) فى النصف الثانى من القرن التاسع عشر، تمثل هذه النظرية نموذجا لكيفية حدوث التطور مثلها فى ذلك مثل نظرية الجاذبية لنيوتن. لقد طور أينشتين نظرية الجاذبية ووضع النظرية النسبية العامة لتصف تفاعلات مجالات الجاذبية القوية. بالنسبة لنظرية دارون – والاس فهى صحيحة إذا اقتصر العرض على عدد صغير من الأنواع وتفاعلها بعضها مع البعض ومع البيئة المحيطة بها.

تتلخص نظرية التطور فى ثلاث خطوات منطقية: يشابه أول مولود أبويه، ويرث الصفات ذاتها التى تنتقل من جيل لآخر، ولكن ميكانيكية نسخ هذه الصفات ليست مثالية؛ ولذا تحدث بعض الاختلافات البسيطة (أحيانا غير بسيطة) بين الأفراد فى جيل واحد. النقطة الأساسية التالية هى أنه ليس كل المواليد فى جيل واحد تعيش لتلد جيلا ثانيا – والسؤال هنا – لماذا يعيش بعض الأفراد حتى تتوالد بينما يموت الآخرون؟ الأفراد الذين يعيشون هم الأفراد الذين تأقلموا بشكل أفضل مع البيئة المحيطة – بمعنى: هم الأفراد الأقدر على الحصول على الغذاء، وكذلك فى جذب الجنس الآخر للتزاوج وأيضا الأقدر فى أساليب النجاة من أن تأكلهم كائنات أخرى. هذا هو معنى «البقاء للأصلح».

لنعد الآن إلى بداية السلسلة المنطقية: يبقى الأفراد الأصلح ويتزاوجون ويتكاثرون ويعنى ذلك أنهم يورثون صفات التفوق هذه للجيل القادم، ومن هذه الصفات، القدرة على التأقلم إذا ظلت هذه البيئة المحيطة دون تغير (وهذا قلما يحدث) فإن هؤلاء الأفراد وما بعدهم من أجيال سوف يكتسبون صفات أفضل وأفضل للتأقلم مع البيئة المحيطة – هذا هو ما قاد دارون إلى ما أسماه «قانون الانتخاب الطبيعى». توصل دارون إلى المبدأ هذا بعد دراسة أنواع الطيور فى أرخبيل «جالاپاجوس» حيث لاحظ اختلاف مناقير الطيور باختلاف نوع الثمار ومدى صلابتها من جزيرة لأخرى. ليس الصراع فقط مع النباتات التى تحمل الثمار التى تتغذى عليها هذه الطيور وإنما هناك أيضا صراع بين أفراد النوع الواحد. ثمة مثل آخر : إذا كان نوع ما من التلوث يؤثر

(*) تسمى كذلك نظرية النشوء والارتقاء أو ببساطة نظرية دارون.

على ذوى الأنوف الصغيرة، فإن الأفراد ذوى الأنوف الكبيرة سوف يملكون ميزة معينة مقارنة بذوى الأنوف الصغيرة، وبالتالى من جيل إلى آخر سوف يزداد حجم الأنوف فى هذه العائلة.

لنورد مثالا عمليا على هذا: لقد قام الزوجان بيترو روزمارى جرانت (Peter &, Rosemary Grant) فى ١٩٧٠م بدراسة الطيور فى جزيرة دافنى (Daphne) فى أرخبيل «جالاباجوسى» الذى ورد ذكره، وهى موطن العصافير الأرضية التى تحمل اسم (Geospiza Fortis) ، والتى تستخدم مناقير طويلة لكسر البذور. فى عام ١٩٧٧م حدث جفاف شديد على الجزيرة، مات بسببه حوالى ألف من العصافير هذه من أصل ١٢٠٠ عصفور كانت تتم دراستهم. مات هذا العدد لأن النباتات التى يتغذون عليها قد جفت، ووجد الباحثان أن الطيور التى نجت كانت هى الضخمة ذات المناقير الكبيرة. قام فريق الدراسة بقياس أطوال المناقير ووجد أنها زادت بمقدار ٤٪ بعد الجفاف مقارنة بأطوالها قبل الجفاف. بهذا نصل إلى نهاية هذا التسلسل المنطقى إلى أن الانتخاب الطبيعى يقودنا إلى ما يسمى (الإستراتيجية) نحو استقرار تطورى» "Evolutionary Stable - Strategy" (ESS) .

تأتى هذه الرؤية من استخدام قوانين «نظرية الألعاب» (Games Theory) – والتى لعبت دورا مهما فى الحرب الباردة. لقد كان جون ماينارد سميث John My-nard Smith من جامعة سسكس University of Sussex أحد المتخصصين البارزين فى هذا المجال ، لقد أورد المثال التالى:

لنتصور أن جماعة من المخلوقات يمكن وصفها بإحدى صفتين: إما «صقور» وتتصرف بعنف مع أعضاء الجماعة الآخرين، و«حمائم» وهؤلاء مسالمون إلى حد كبير. عندما يلتقى صقران حول قطعة من الطعام فسوف يتصارعان ويتقاتلان حتى يموت أحدهما، وبالتالى يفوز الآخر بالغذاء. عندما تلتقى حمامتان عند قطعة من الغذاء سوف تنسحب إحداهما بهدوء وتفوز الأخرى بالوجبة. حتى نحصل على نتائج كمية لابد أن نضع نقاطا لكل حدث. فمثلا نضع خمسين نقطة للطعام، إذا فاز اللاعب بالوجبة فهو يكسب ٥٠ نقطة، وإذا هرب من المواجهة فلن يحصل على أية نقطة، وإذا تعارك الفرد من أجل الطعام فربما يحدث له جرح ويفقد مائة نقطة، وإذا فاز بالطعام فإنه يحرز خمسين نقطة. إذا قام بما يعتبر تهديدا قبل الفوز يضاف له عشر نقاط، ولنأخذ مثالا عدديا: لنفرض أننا بدأنا بمجموعة من الحمائم ننتهى إلى أن كل فرد يحصل على ١٥ نقطة ولا يؤذى أحد الآخر، وبذا نجد أنفسنا أمام مجتمع مثالى (يوتوبيا).

لنتصور الآن أن صقرا واحدا ظهر فى هذه المجموعة نتيجة لطفرة چينية. طالما

كان عدد الصقور قليلا فلن يحدث تغير كبير فى المجموعة، وسيحصل كل فرد على الطعام وما يقرب من ١٥ نقطة، ولكن سوف يتكاثر الصقر وينتج صقورا أكثر وأكثر، وبالتدريج سوف تتفوق صفات الصقور. ماذا لو كانت المجموعة مكونة من صقور فقط؟ بالتأكيد سوف تحدث كارثة حيث سيفوز فى كل مواجهة أحد الصقرين بخمسين نقطة، ويفقد آخر مائة نقطة، ويكون المتوسط (– ٢٥) نقطة، يعنى هذا أن هذه المجموعة سوف تفنى وبسرعة ما لم يوجد غذاء وفير جدا. لنتصور ظهور حمامة واحدة فى هذه المجموعة . سوف تتكاثر الحمامة وسوف تتفوق صفات الحمامة فى هذه المجموعة بعد فترة.

هاتان الحالتان المتطرفتان ليستا مستقرتين، وإنما سوف يكون هناك دائما تطور نحو حالة الوسط. أفضل نسبة تحفظ استقرار مثل هذه المجموعة هو خمس حمائم لكل سبعة صقور . فى هذه الحالة سوف يحصل كل فرد على ٦,٢٥ نقطة فى كل مواجهة . أهم نقطة هنا أن «إستراتيجية الاستقرار التطورى» سوف تدفع النظام كله إلى هذا الوضع . هذا الوضع ليس بالضرورة الأفضل مقارنة مثلا بالنتيجة ١٥ نقطة لكل فرد إذا كانت المجموعة كلها حمائم.

لقد تأكد دور «إستراتيجية الاستقرار التطورى» فى علم البيولوجيا التطورية فى الكشف عن الصور الفعلية التى نراها فى بعض المجموعات، ولكن كما يوضح المسمى نفسه فإنها تتفاعل مع النظم المستقرة مثلها فى ذلك مثل الديناميكا الحرارية الكلاسيكية. فى مثل هذه النظم يتفاعل عدد قليل من المكونات (فى هذه الحالة السلوك الصقورى والسلوك الحمائمى يمثلان مكونين مرتبطين برابطة واحدة) توجد أمثلة أعقد بقدر ضئيل ولكنها مثل الشبكات البسيطة من المصابيح التى تعمل حسب قواعد جبر بول (Boolean Algebra) – حيث تتجمد عند حالة واحدة أو عند عدد محدود من الحالات. ولكن هناك إمكانية أخرى أن تكون البيئة البيولوجية متغيرة وتكون المجموعة السكانية سريعة التغير لتلاحق تغير هذه البيئة. من أفضل الأمثلة على هذا وإن يكن بعيدا عن البيولوجيا ولكنه معبر عن هذا الوضع بشكل واضح جدا:

نقصد بهذا سباق التسلح إبان الحرب الباردة ويسمى هذا «بظاهرة الملكة الحمراء» مقتبسا من كتاب لويس كارول (Lewis Carroll) – بعنوان «من خلال زجاج الرؤية» والتى كان لابد لها أن تجرى بأقصى قوة حتى تثبت فى نفس المكان.

يحب كاوفمان أن يستخدم مثالا عن الضفدعة الافتراضية التى تتغذى على حشرة افتراضية، فهناك عدة فرضيات حول كيفية نجاح الضفدعة فى اقتناص الذبابة، أما إذا كان جسم الذبابة أملسا فيمكنها الإفلات بشكل أفضل. لنفترض أنه

بالقرب من بركة ما يعيش عدد معين من الضفادع التى تأكل نسبة معينة من الذباب، إذا حدث وأن أصبح لسان إحدى الضفادع أكثر لزوجة فسوف تفوق أقرانها وسوف يتحور لسان الأجيال التالية من الضفادع ويصبح أكثر لزوجة. فى نفس الوقت سوف تتحور أجسام الذباب لتصبح أكثر ملامسة ونعود لنفس النسبة، ولكن أصبحت ألسنة الضفادع أكثر لزوجة وأجسام الذباب أكثر ملاسة.

يحدث هذا فى كل النظم وكل يوم حتى يحدث استقرار، لكن فى النظم الحقيقية هناك أنواع عديدة تتفاعل بعضها مع بعض. إذا كان أى تغير فى أى نوع يؤثر على الأنواع الأخرى فنحن أمام شواشى مؤكد، لأن أى تأثير صغير سيؤدى إلى تغيرات كبيرة ويستحيل توقع ماذا سيحدث فعلا. فى العالم الحقيقى، أى تغير فى نوع ما سوف يؤثر على الأنواع المجاورة، وهذه بدورها تؤثر على جيرانها وهكذا.

لنأخذ مثالا آخر من الحياة - تأكل الثعالب الأرانب - وما يحدث للأرانب سوف يؤثر مباشرة على الثعالب والعكس، ولكن الثعالب لا تأكل الحشائش ولذلك ما يحدث للثعالب لا يؤثر على الحشائش، ولكن الأرانب تأكل الحشائش إذن الأرانب والثعالب عقدتان مرتبطتان مباشرة فى الشبكة، والأرانب والحشائش عقدتان مرتبطتان مباشرة فى نفس الشبكة وهكذا، فإذا قل عدد الأرانب فإن الحشائش سوف تنمو أطول وسوف يؤثر هذا على أنواع أخرى من الكائنات التى تتغذى على الحشائش . إذا أضفنا السمك فى البحيرة والذى يتغذى أيضا على الذباب أصبحنا أمام شبكة معقدة والتى سميت بشبكة الحياة (Web of Life) حتى قبل أن يستخدم كاوفمان وغيره هذا التعبير.

نخلص من هذا أنه نظرا للترابط الشديد بين المكونات سوف تتجه هذه الشبكة إلى مرحلة «التنظيم الذاتى الحرج» أى إلى تحول حالة قرب الشواش. إذا انغلقت مجموعة من الكائنات فى إستراتيجية مستقرة، فطفرة فى أحد الأنواع سوف يؤدى إلى انفتاح فى الشبكة، وبالتالى يمكن أن تبدأ فى التطور، مما يؤثر على بقية المكونات فى الشبكة ويدفعها إلى حالة الشواش.

يوسع كل هذا فهمنا لما يحدث فى النظم البيولوجية، مما يذكرنا بما فعله إليا بريجوجين فى الديناميكا الحرارية الكلاسيكية ، لقد بدأ هذا العمل ر. ا. فيشر (R. A. Fisher) [١٨٩٠ - ١٩٦٢م] فى محطة تجارب روثامستيد Rothamsted Experimental Station) . لقد كان فيشر أول من وضع الأسس الرياضية للبيولوجيا التطورية على أساس أن الانتقاء الطبيعى فى أحد أعضاء المجموعة يؤدى إلى تغير فى توزيع الجينات فى هذه المجموعة، ولكن فيشر كان مهتما بالحالات المستقرة للنظم المختلفة مثله فى ذلك مثل علماء الديناميكا الحرارية الكلاسيكية.

قام العالم سيوال رايت (Sewall Wright) (١٨٨٩ - ١٩٨٨م)، والـذى عمل فى جامعة ييل (Yale University) فى الخمسينيات من القرن الماضى، بوضع تصورا عن المنظر الطبيعى (Landscape) حيث تمثل التلال، استراتيجية تطورية ناجحة (جينات جيدة - وبشكل أدق مجموعة من الجينات التى تعمل جيدا بعضها مع البعض) ، وتمثل الوديان إستراتيجية تطورية غير جيدة (أو جينات سيئة). تمثل كل نقطة فى هذا المنظر الطبيعى فردا من مجموعة. فى هذه الحالة نرى أن المنظر الطبيعى هذا يمثل فراغا طوريا فى الواقع، حيث تكون الوديان هى الجاذبات، ولكن لأن أفراد المجموعات يختلف كل منها عن الآخر، ففى الواقع سوف تمثل المجموعة بتجمع من النقاط مثل قطيع من الغنم. سوف تترك الغنم التى تقع فى أعالى المنظر الطبيعى عددا أكبر من الصغار، وتلك التى فى قاع المنظر الطبيعى سوف تترك عددا قليلا من الصغار، ومع مرور الأجيال سوف تصعد هذه المجموعة إلى أماكن أعلى حتى تصل إلى قمة ما وتبقى عندها.

هذه الصورة مثالية إذا كنا نتعامل مع نوع واحد يتفاعل مع عدد قليل من المكونات الأخرى وفى وسط محيط مستقر - مثال جيد لما حدث للطيور التى درسها دارون فى جالاباجوس ، يؤمن الكثير أن هذه الطيور قد انحدرت من عدد قليل من الطيور وربما من زوج واحد من هذه الطيور، تطور بعض أفراد هذه المجموعة ونمت لهم مناقير أطول، وبذا صعدت بعض التلال فى هذا المنظر الطبيعى، ونمت للبعض الآخر مناقير أقوى وصعدت إلى قمم تلال أخرى، وهكذا أصبح النوعان مختلفين، ثم تطور آخر عندما تطول أو تتضخم المناقير بحيث تصبح عائقا فى تناول الطعام، فعند هذا الحد يتوقف التطور.

لقد صور نموذج فيشر بشكل جميل ما يحدث مستخدما فى ذلك رياضيات بسيطة، ولكن ظهرت مشكلة! لنفرض أن المناقير التى تطورت وضعت هذه الطيور عند قمة تل منخفضة فى حين هناك قمم أخرى أعلى (أى حالات تطور أفضل)، إضافة إلى هذا لا تستطيع هذه الطيور اختراق الحواجز لتصعد لقمم أعلى، فهى لكى تحقق هذا لابد وأن تتطور للأسوأ ثم تبدأ عملية تطور جديدة لتصعد إلى قمة أعلى، وكأنها دخلت طريقا مسدودا لا تستطيع الهرب منه. بذا يصبح نموذج فيشر ستاتيكيا، بحيث تبقى الأنواع عند قمم معينة وتظل هناك.

إن «ظاهرة الملكة الحمراء» مثال لكيف تؤدى التفاعلات بين الأنواع لتغيير هذه الصورة. إن التغير فى أحد الأنواع سواء كان طفرة أو حتى اندثار سوف يؤثر على بقية الأنواع - يبدو هذا وكأن القمم نفسها فى المنظر الطبيعى قد تغيرت. فى النظام الإستاتيكى لا تتغير القمم، أما فى النظام الشواشى فالتغيرات تتم بسرعة،

بحيث لا تلاحقها تغيرات الأنواع. أما على حافة الشواشى حيث تتغير قمم المنظر الطبيعى ولكن ببطء، بحيث يُفتح كل هذا المجال لتطور المجموعات أو أفراد هذه المجموعات ضمن نفس الوسط البيئى المحيط.

وهكذا يمكن أن ننتقل إلى تصور أن هذا المنظر الطبيعى هو من مطاط يتغير شكله مع تحرك الأنواع عليه بحيث يتيح الفرصة لتطور لا نهائى. فى المثال الذى سقناه سابقا عن الضفدعة والذبابة - إذا أتى الإنسان بكمية من المبيد الحشرى فسوف يدفع الذباب من القمة التى يجلس عليها إلى القاع، ولكن ما لم تفن كلها وتندثر فإنها سوف تكتسب مناعة ضد المبيد هذا، وهكذا يصعد الذباب إلى قمة أعلى، لم يكن ليحدث هذا ما لم يحدث الفناء الجزئى لهذا الذباب، وهكذا.. وعلى عكس تصور فيشر فإنه لا يوجد «أفضل مكان» يستقر عنده النوع ويبقى، لابد وأن يظل النوع يتطور متى ما أتيحت له الفرصة، ورغم أن ما يمكن وصفه بأنه وضع أفضل لجيل ما، يمكن أن يكون سيئا بعد عدة أجيال.

لقد لفت النظر چون هولاند (John Holland) - من جامعة متشجان فى آن أربور - إلى أهمية تفاعلات الأفراد فى المجموعات . يندرج هذا من التفاعل بين الجينات داخل الخلية، إلى مجموعة الخلايا فى عضو بالجسم، إلى مجموعة من الأنواع مرتبطة بعضها بالبعض فى شبكة تتفاعل تفاعلا يقع بين «إستراتيچية الاستقرار التطورى» والانفصال التام غير المعتمد على أى عوامل خارجية. عبر هولاند عن تصوره فى نص «إن وقف أو محاولة التطور تكمن ليس فى الوصول إلى حيوان جيد، ولكن فى الوصول إلى قوالب جيدة تُنتج حيوانات جيدة عندما توضع معا». يورد هولاند أفضل مثال على ذلك طريقة «أجزاء الصور» التى كانت تستخدم قبل تطور الحاسب فى البحث الجنائى لتركيب صورة مجرم ما، بناء على الأوصاف التى يعطيها الشهود. انبنت هذه الطريقة على جمع قطع من الصور تحوى تسريحة الشعر، حجم الأنف.. وهكذا للوصول إلى صورة تشبه الأوصاف التى ذكرها الشهود. ويتم ذلك بسرعة ملحوظة، خاصة إذا تذكرنا أنه كان يتم التعامل مع 10^{10} من التركيبات المختلفة، وهو عدد يفوق بكثير جدا عدد سكان الأرض الحالى. يفضى كل هذا إلى الحديث عن التطور المشترك (coevolution) وليس عن التطور فقط.

إن ليى ڤان ڤالن (Leigh Van Valen) بعد دراسة الحفريات البحرية والتى قادته لوضع «ظاهرة الملكة الحمراء» فى عام ١٩٧٣م التى سبق التنويه عنها - وجد أنه بالنسبة لأى نوع (أو جنس) مثل الأسماك العظيمة - هناك احتمالية الاندثار من السجل الأحفورى، بصرف النظر عن المدة التى عاشها هذا النوع. إن فرص الاندثار عند أى فترة مختارة من السجل الأحفورى متطابقة. نفس الشيء ينطبق على

المستويات الأخرى من «شبكة الحياة»، يعنى هذا أن الأنواع لا تكتسب فرصا أفضل أو أسوأ بناء على التطور - إنها تندثر عشوائيا. يبنى ڤان ڤالين تصوره هذا على أساس أن الصراع من أجل البقاء هو خيار صعب كما كان فى كل العصور الماضية. نظرا لأن هذا الصراع يشمل أنواعا مختلفة يتفاعل بعضها مع البعض فإن الكل يحاول أن يكون أكثر كفاءة إلى أن يحدث شيء يزيل نوعا ما من الحياة. يؤدى هذا إلى إعادة ترتيب الأنواع فى المواضع البيئية المخصصة لها، ويتبع ذلك سباق تسلح جديد يستلزم جريا أسرع فى المكان، أى على كل الأنواع أن تبذل أقصى ما عندها لكى تتعايش مع الأنواع الأخرى حسب «ظاهرة الملكة الحمراء» كما سبق.

يؤدى هذا إلى تسارع عملية التطور والتأقلم وأفضل مثل على ذلك هو التطور عن طريق التكاثر الجنسى، حيث تختلط چينات الأبوين لينتج مولود كبير، ينمو ببطء قادر على التنافس فى معركة سباق التسلح مع المخلوقات الصغيرة، مثل البكتريا والطفيليات والتى تتكاثر بسرعة كبيرة.

ثمة جانب مهم لابد أن نشير إليه: رغم تركيزنا على الانتخاب الطبيعى للأفراد، إلا أن مجموعة الأفراد هذه تتفاعل مع بعضها البعض بشكل إيجابى، مثل فريق كرة القدم والذى يتكون من إحدى عشر لاعبا عدا المدرب والمديرين وغيرهم - إلا أننا ننسب النصر والهزيمة إلى النادى أو الفريق بصرف النظر عن أداء كل فرد فيه.

وهكذا نرى وباختزال معقول كيف تتم التغيرات التطورية فى السجل الجيولوجى بدلالة «طفرات» أو «فناء» لأنواع ما كلية - دون النظر إلى الانتخاب على مستوى الأفراد. إن المثل المفضل ليوضح هذا هو مثال الفأر الافتراضى الذى يتطور ببطء ليصبح فى حجم الفيل.

لنتصور أن فأرا ينمو بحيث يكون أكبر بقليل من والديه، ويظل معدل النمو ثابتا فى كل جيل، بحيث يحتاج ذلك إلى ٢٠ ألف جيل لكى يصبح الفأر فى حجم الفيل. لكن الفئران تنمو بسرعة كبيرة، والفيل ينمو ببطء شديد. لنفرض فى مثالنا الافتراضى هذا أن كل جيل يحتاج إلى خمس سنوات لكى يصبح فردا بالغا - وهى فترة بين فترة بلوغ الفأر والفيل؛ لذا يحتاج نمو الفأر إلى حجم الفيل مائة ألف عام. بمقياس الحفريات يعتبر هذا التحول لحظيا، بحيث سنرى فى الحفريات فى طبقة ما فأرا بحجم الفأر المعتاد وفى الطبقة التالية فأرا بحجم الفيل - ولا شيء آخر بينهما بالطبع سوف يؤثر هذا التغير على الأنواع الأخرى، ورغم أن كل هذا يتم ببطء وحسب نظرية الارتقاء لدارون.

كل هذا مهم نظرا للخلاف الذى نشب بين المتخصصين فى نظريات التطور

حول ما سُمى «بالتطور الفاصلى» (Punctuatory evolution) الذى يبينه السجل الأحفورى حيث تمر فترات طويلة دون تطور ملحوظ للأجناس عدا تأقلم بسيط مع الفتحات البيئية المخصصة لهذه الأنواع.

ثم «تطور فاصلى» يتم خلال فترات زمنية صغيرة نسبيا، تعتبر لحظية على المقياس الجيولوجى، لذا نرى أحيانا إندثار أنواع وظهورا فجائيا لأنواع أخرى. كان كل هذا يعتبر متناقضا مع نظرية داروين عن التطور والارتقاء والذى يسمى أحيانا «بالتطور التدريجى». وهنا نجد أنه لا محل للتناقض – حيث إن كل تطور يتم تدريجيا – إذا لم نر فأرا يلد فيلا، ولا يمكن أن يحدث هذا والعكس بالعكس(*) .

يمكن أن نوضح هذا على مثال كومة الرمل – عندما تكون «كومة الرمل» فى حالة التنظيم الذاتى الحرج تحدث بها الانهيارات، وتفصل هذه الانهيارات فترات معقولة من الزمن تقضيها الكومة فى هدوء، وتتراكم حبات الرمل بعضها فوق البعض – حبات الرمل متشابهة حيث إنها كلها تخضع للجاذبية ونفس قوانين نيوتن، وقوى الاحتكاك .. وغيرها. العبرة هنا تكمن فى الكيفية التى نرصد بها هذه الانهيارات، فإذا كنا نسقط حبة رمل كل ثانية وننظر إلى الكومة كل نصف ساعة، نجد أن شكل الكومة قد تغير كلما نظرنا إليها، وسوف تبدو الكومة فى حالة تغير مستمر ، ولكن إذا نظرنا للكومة كل ميكروثانية سوف نرى أن شكل الكومة يتغير تدريجيا،حيث سنرى أن حبات الرمل ظلت فى أماكنها عندما نظرنا إليها فى هذه الفترات الزمنية القصيرة جدا. وحيث إن الشبكات البيئية تظل كما هى عبر مئات الملايين من السنين فسوف تبدو الصورة ثابتة خلال مليون عام ، فهذا هو «الاتزان الفاصلى» ، وإن كانت الأنواع المشاركة فى هذه التغيرات لا تحس بأى تغير درامى يحدث لها وإذا استغرقت التغيرات مائة مليون سنة، فإن الكمون لمدة مليون سنة يمكن أن نسميه «الشواش الفاصلى». ويمكن أن نطبق هذا على الشبكات عندما تكون مكوناتها متصلة بعضها بالبعض بشكل مبعثر . هناك نقطة هامة أغفلها كاوفمان ولكن تنبه لها بر باك "Per Bak" وزملاؤه فى منتصف التسعينيات.

فى كل الأعمال السابقة كان الباحثون يستخدمون نماذج حاسوبية حيث تحدث طفرات بشكل عشوائى، وكانوا يرصدون كيف تنتشر هذه التغيرات لتؤثر على بقية مكونات الشبكة، مثلها فى ذلك مثل الانهيارات التى تحدث فى كومة الرمل، ومع هذا لم تندفع المنظومة نحو حافة الشواش، حدث تطور مهم جدا عندما زار كيم سنيبن (Kim Sneppen) – من معهد نيلس بور (Nils Bohr) فى الدانمرك –

(*) يمكن أن نعتبر أن الأحداث التى صاحبت الجفاف الذى حدث فى عام ١٩٧٧م فى جزر جالاباجوس كمثال على «الاتزان الفاصلى "Punctuated Equilibrium".

زاره فى بروك هافن فى عام ١٩٩٣م – لقد كان سنيپن مهتما بتفاعلات الأسطح – مثلا: ماذا يحدث عندما يلقى قليل من القهوة على مفرش ونرصد كيف تتغير أشكال بقع الماء على المفرش أيضا . يسمى هذا الوضع فى الفيزياء «بديناميكا الحدود القصوى» "extremal dynamics" – اتفق باك وسنيپن على استخدام شكل ما من أشكال هذا التصور لوضع نموذج للمنظومة البيئية حتى تصل إلى حافة الشواش. القيم القصوى فى المنظومة البيئية هنا تعبر عن المكونات المتوائمة تماما مع البيئة، وتلك غير المتوائمة مع البيئة المحيطة.

وضع الباحثان رقما لكل عينة تقع بين الصفر والواحد، بحيث يكون الرقم الأعلى للنوع الأفضل تلاؤما مع البيئة والأقل للأقل تلاؤما – لتمثيل التفاعلات بين المكونات ثم الاكتفاء برابطتين فقط لكل نوع. تم إجراء البرنامج مع حذف العينات غير المتوائمة مع جَارِيْها واستبدالهم بثلاثة جدد، ذوى مواءمة عشوائية. فى الواقع هذا النموذج هو المنظر الطبيعى المطاطى.

فى البداية تختار المنظومة بشكل عشوائى ، حيث توجد عقد تمثل مواءمة تغطى كل القيم من الصفر إلى الواحد. عند إزالة النوع ذى المواءمة المنخفضة واستبدالها بأنواع أخرى سوف تكون بالضرورة ذات مواءمة أفضل، وبالتدريج ترتفع مواءمة الشبكة ككل، وتنتهى الشبكة إلى مواءمة قدرها ثلثان لكل مكونات الشبكة، وتستقر المنظومة عند هذا الوضع. ولكن ماذا يحدث عندما تحدث طفرة لنوع ما تقلل من مواءمته والتى ستؤثر حتما على جيرانه؟ سوف ينتشر هذا التأثير فى الشبكة التى تمثل صورة طبيعية مطاطية، ورغم عدم حدوث انخفاض فى مواءمة هذه الأنواع، لكن يمكن أن تتغير الصورة الطبيعية نفسها لتجد هذه الأنواع نفسها فى وضع أسوأ مما كانت عليه. سوف تمر المنظومة بفترات استقرار تتبعها فترات اندثار لبعض الأنواع وهكذا، رغم أن القواعد التى اخترناها ثابتة وتعمل بنفس الطريقة خلال فترات الاندثار والاستقرار. مرة أخرى نحصل على قانون أسِّى ولكن قيمة الأس تختلف عن قيمته المستنتجة من السجل الأحفورى.

رغم نقد الناقدين بأن النموذج بسيط بدرجة تجعله غير واقعى إلا أنهم يتجاهلون حقيقة أن النماذج البسيطة تصف بشكل جيد ما يحدث فى الواقع. العبرة فى النموذج ليس مدى بساطته، وإنما مدى قدرته على تبيان الصورة الداخلية لما يحدث فى النظام الذى يمثله. مثل جيد على ذلك هو نموذج بور للذرة على بساطته فإنه أعطى قيما صحيحة لأطوال موجة الأشعة التى تصدر عن ذرات العناصر المختلفة، وكلنا نعلم الآن أن هذا النموذج احتاج لتحسينات عديدة مع اكتشاف خواص أعمق

لهذه الخطوط. كذلك من الواضح أن نموذج باك - كاوفمان يحتاج لتحسين أكبر حتى يعطى نتائج أفضل تتوافق مع نتائج دراسة السجل الأحفورى.

قام كل من لويس أمارال (Lewis Amaral) من معهد ماساتشوستس للتقانه ومارتين ماير (Martin Meyer) من جامعة بوسطون، بإضافة عنصر جديد إلى هذا النموذج يتمثل فى الحيوانات المفترسة والفرائس، وإن كان النموذج يظل بسيطا إلا أنه أحدث تقاربا هائلا بين النموذج والواقع.

فى هذا النموذج توجد ست طبقات من الغذاء، حيث تتغذى الأنواع فى طبقة واحدة على عدة أنواع من الطبقة الأسفل، وفى كل طبقة آلاف من الفتحات البيئية (ecological niches) - تكافئ العقد فى نموذج باك - سنيبن . يبدأ النموذج بكل الفتحات البيئية فارغة وقليل من الأنواع موزعة بشكل عشوائى على الطبقة السفلى من هذه السلسلة، ثم اختيار قاعدة بسيطة عبارة عن احتمالية ضئيلة لكل نوع فى البداية أن ينقسم إلى نوعين جديدين يتوزعان عشوائيا على الفتحات البيئية المتاحة على نفس المستوى أو فى مستوى أعلى أو أقل بالنسبة للوالدين. لكل نوع جديد تخصص عدة أنواع من المستوى الأدنى لكى تكون فرائس لهذه الأنواع. فى كل خطوة تختار بشكل عشوائى عدة أنواع من الطبقة السفلى لتندثر . هنا يكمن الفارق الجوهرى بين هذا النموذج ونموذج باك - سنيبن ، حيث لا يؤثر اندثار نوع ما على جيرانه فى نفس الطبقة، وإنما على نوع من الطبقة الأعلى والذى يمثل النوع الذى يفترسه. بهذه الطريقة وجد أن المنظومة تنظم نفسها وتتجه نحو حافة الشواش. مرة أخرى نجد أن عملية الاندثار تتبع قانونا أسّيا، والأهم من ذلك أن كل هذا يحدث دون الحاجة إلى أى مؤثر خارجى.

ولكننا نعلم بوجود بعض المؤثرات الخارجية كتلك التى ارتبطت بتأثير سقوط نيزك على الأرض أدى لاندثار الديناصورات. فى التسعينيات قام مارك نيومان (Mark Newman) - من جامعة كورنيل - بدراسة نموذج يعتبر أن المؤثر الخارجى هو السبب الوحيد لفناء أحد الأنواع مع إهمال التفاعلات البيئية بين الأنواع على المنظر الطبيعى المطاطى. فى هذا النموذج تزال كل الأنواع منخفضة المواءمة، وتبقى فقط الأنواع الأعلى تواؤما - وتملأ بعد ذلك الفتحات البيئية الفارغة بأنواع جديدة بشكل عشوائى . أيضا تم إدخال مؤثرات خارجية عالية ومتوسطة القوة. أكدت النتائج العملية لهذا النموذج مدى جودته، إذ نتج عنه قانون أسّى للاندثارات بقيمة أس تساوى الأس الناتج عن دراسة السجل الأحفورى.

تتم الصورة بشكل تدريجى حيث يعمل تطور داروِن ويتنامى الإجهاد فى المنظومة حتى يصل إلى قيمة حرجة فيحدث زلزال فى كل أو فى جزء من

المنظومة. يكون جزء من هذا الإجهاد المتنامى بسبب تأثير الملكة الحمراء. فى نفس الوقت لا توجد وسيلة لكى نتوقع قيمة أو مقدار الحدث التالى هل هو ضعيف أم قوى .. وهكذا . بهذا تتبع النظم الحية وغير الحية نفس النظام . كل هذه المؤثرات تؤدى فى النهاية إلى القانون الأسّى لعمليات الاندثار. نخلص من هذا أن السجل الأحفورى يمكن أن يشى فقط بعمليات الاندثار وهى بدورها يمكن أن تكون بسبب مؤثرات خارجية مثل اصطدام نيزك أو حدوث براكين أو زلازل أو أشياء أخرى، أو بمجرد التطور التدريجى أو كل ذلك، كما فى رواية أجاثا كريستى «جريمة فى قطار الشرق السريع» حيث يمكن أن يكون الجميع مذنبين.

هكذا نرى أن هذا النموذج على بساطته، إلا أنه يعطى فكرة عميقة عن سلوك النظم الحية، حيث يبين كيف تتطور هذه النظم، من أى بدايات وتحت تأثير تأثيرات مختلفة داخلية وخارجية، فإنها تصل إلى حالة تنظيم ذاتى حرجة على حافة الشواشى حيث يحدث تغير كبير فى النظام ككل تحت تأثير مؤثر خارجى ضعيف. هذا هو ما يحدث فى الحياة حقيقة.

حسب نموذج نيومان نرى أنه عند تغير البيئة الفيزيائية يتغير المنظر الطبيعى - وتغير الحياة المنظر الطبيعى الخاص بالتواؤم، وهكذا تتأثر الحياة بكلا هذين المؤثرين . يؤكد هذا الاندثار الأكبر الذى حدث عند نهاية العصر البيرمى، ولم يكن ليحدث هذا ما لم تكن كل هذه المكونات مرتبطة مع بعضها البعض فى شبكة حياتية واحدة. الآن إذا حدث مثل هذا الحدث فى أمريكا الشمالية فسوف يؤثر غالبا فقط فى الأمريكتين ولن يمتد تأثيره إلى أفريقيا وآسيا وأستراليا وأوربا، أما فيما سبق فكانت كل هذه القارات مساحة يابسة واحدة - فتأثرت كل أنواع الحياة على اليابسة، وفى الجزء البحرى قرب شواطئ تلك اليابسة . وهكذا نرى أن البيئة الفيزيائية والبيئة البيولوجية مرتبطتين بقدر فوق ما تصورنا.

ولكن هل العكس ممكن؟ هذا ما يمثل أساس فرضية الجايا (Gaia) التى وضعها العالم البريطانى «جيم لوفلوك» "Jim Lovelock" فى عام ١٩٦٥م وتسبق بكثير نماذج التعقيد والنشوء التى قمنا بعرضها فيما سبق. يمكن الآن الأخذ بفرضية لوفلوك وتعميمها على دراسة الشواش، التعقيد والنشوء لكى تشمل كل الكواكب، ولكى تعطى إشارات عن كيف يمكن أن تكون هناك حياة تطورت على كواكب أخرى خارج المجموعة الشمسية.

الباب السابع

هل هناك «حياة» فى مكان آخر فى الكون؟

لقد رأينا كيف يساعد الشواش والتعقيد فى فهم أساس الحياة والتطور - ولكن السؤال الأكبر الذى يشغل العلم الآن - هل هناك حياة على كوكب آخر غير الأرض ، سواء فى المجموعة الشمسية أو فى الكون ككل؟ يساعد الشواش أيضا طرح رؤية لحل هذه الأحجية، ويبدأ ذلك بطرح رؤية جديدة على الحياة على الأرض، تلك التى تؤكد على أهمية الشبكات المعقدة. الفارق الأساسى هو أننا كنا ننظر للحياة من الداخل إلى الخارج، والآن سوف ننظر لهذه الحياة من الخارج إلى الداخل.

إن التغير فى هذه الرؤية أتت من صورة وإنسان واحد، عاملان متصلان باستكشاف الفضاء. أما الصورة فكانت تلك التى أرسلها رواد السفينة أبوللو والتى أظهرت الأرض كبيتنا فى هذا الكون على شكل واحة باللونين الأزرق والأبيض محاطة بصحراء سوداء، أما الرجل فهو جيم لوفلوك والذى كان أول من قال بأن المكونات الحية وغير الحية فى البيئة الأرضية يتفاعلان كشبكة تحفظ الشروط اللازمة لكى تستمر الحياة على الأرض، وكان هو الشخص الذى ربط بين الديناميكا الحرارية اللاانعكاسية والنظم المختلفة عند حافة الشواش.

ولد لوفلوك فى عام ١٩١٩م وبعد حصوله على درجة البكالوريوس فى الكيمياء من جامعة مانشستر فى عام ١٩٤١م، وأمضى سنوات عديدة فى أبحاث طبية، واخترع أجهزة طبية عديدة. فقط فى الستينيات من القرن الماضى استطاع أن يستقل ويقوم بأى بحث يحبه، علما بأنه كان طيلة حياته مستقلا فى فكره. لقد عمل فى وكالة الفضاء الأمريكية، وكان مستشارا لتصميم بعض الأجهزة الخاصة بمركبات الفضاء التى كانت تعد للنزول على القمر والمريخ، ثم تقوم بتحليل التربة على هذين الكوكبين. جنح لوفلوك بعد ذلك إلى الانخراط فى تصميم أجهزة للبحث عن قرائن وجود حياة على المريخ . لقد كان المطلوب تطوير تكنولوجيات متقدمة جدا جدا حتى تستطيع النزول على المريخ - جمع المعلومات ثم إرسالها إلى الأرض، لقد كان مستوى هذه الأجهزة المطلوبة بالنسبة لما هو متاح مثل جهاز التليفزيون مقارنة بالتكنولوجيا فى العصر الرومانى.

يتذكر لوفلوك كيف أتت له فكرة «الجايا» - ففى عام ١٩٦٥م وكان قد عاد لإنجلترا ولكنه كان يزور مختبر الدفع النفاث فى الولايات المتحدة، فى إحدى هذه

الزيارات كان النقاش حول نوع الحياة على المريخ ، وكان الكل مؤمنا بأن البحث سوف يدور عن نمط حياة شبيهة بالحياة مثلا فى صحراء موجاف (Mojave Desert) والتى كانت على بعد عدة كيلو مترات من تلك المختبر. لكن لحت له فكرة أن الحياة يمكن أن تكون مختلفة تماما على المريخ عن هذه التى تعودنا عليها على الأرض. ولذا اقترح إجراء تجربة للبحث عن بعض مظاهر الحياة عامة وليست تلك التى على الأرض.

رد لوفلوك أنه يحتاج فقط لتجربة يثبت فيها أن الأنتروبية تنقص. لاقى لوفلوك استغرابا كبيرا وطلب الحاضرون منه أن يقترح تجربة عملية يمكن إجراؤها. وجد لوفلوك التجربة وكان الغريب أنها بسيطة جدا. إن أفضل طريقة للبحث عن الحياة على المريخ هو تحليل الغازات المكونة لغلافه الجوى. إذا كانت هذه الغازات فى اتزان ثرموديناميكى وكيميائى وتحوى نسبة عالية من ثانى أكسيد الكربون فهذا يعنى أنه لا حياة على كوكب المريخ. أما إذا كانت هناك حياة فإن الغلاف الجوى لابد وأن يحوى «نفايات» الحياة من غاز الميثان والأكسجين.

كانت هناك إمكانات أخرى مثل إمكانية وجود أصوات على المريخ وبتحليلها يمكن الحصول على «معلومات» – أى ضوضاء (1/f) – ويكون هذا دلالة على وجود حياة.

أصبح لوفلوك مستشارا لبرنامج البحث عن الحياة على المريخ، ولكن لم يوافق الكونجرس على تمويل هذا المشروع،وانتهى مشروع «ڤايكنج» بحمل أجهزة تقليدية إلى المريخ . تعليقا على ما حدث قال لوفلوك إن الرحلة تشبه إرسال إنسان آلى إلى صحراء موجاف يحمل سنارة صيد أسماك، وتكون النتيجة عند عودته أنه لا توجد أسماك فى هذه الصحراء.

تصادف عندما كان لوفلوك فى مختبر الدفع النفاث أن وردت الأنباء بأن الفلكيين الفرنسيين فى مرصد بيك دى ميدى (Pic di Midi) – قد حصلوا على معلومات وفيرة عن طيف الغلاف الجوى للمريخ فى المنطقة تحت الحمراء. دلت هذه المعلومات على أن الغلاف الجوى للمريخ مكون كلية تقريبا من ثانى أكسيد الكربون وآثار ضئيلة من غازات أخرى . إنه نظام مستقر مع قيمة عالية للأنتروبية – وهكذا أظهرت هذه التجارب أنه لا ضرورة للتجربة التى اقترحها لوفلوك.

هذه التجارب نفسها دفعت لوفلوك لكى يتفكر فى أمر آخر مهم، وهو أن الغلاف الجوى للمريخ يختلف عن الغلاف الجوى للأرض. كان لوفلوك يعلم أن النيتروجين الموجود فى الغلاف الجوى للأرض يذوب فى مياه البحار والمحيطات مكونا

حامض النيتريك، الذى يؤدى إلى تكون نيترات، والتى تتكسر بفعل البكتريا (باستخدام ضوء الشمس) لكى تعيد النيتروجين للهواء الجوى مرة أخرى. وهنا توهجت لدى لوفلوك فكرة «ماذا يحفظ للهواء الجوى للأرض ثباته على مدى ملايين السنين؟». أوضح لوفلوك عن هذه الفكرة لزميله ديان هيتشكوك (Dian Hitchcock) وكارل ساجان (Carl Sagan) . كانت هذه الفكرة هى البذرة التى بدأت منها فكرة «الجايا» – المسمى الذى اقترحه جار لوفلوك الكاتب البريطانى وليام جولدنغ (William Golding) .

تبين هذه الرؤية أنه لولا الحياة على الأرض لكان الأكسجين قد اختفى من الوجود بشكله الحر كما هو فى الغلاف الجوى واستقر فى مركبات مثل النيترات وثانى أكسيد الكربون، والماء وأكاسيد الحديد وغيرها. يعنى هذا أن البيئة الفيزيائية حساسة لوجود الحياة أو عدمها.

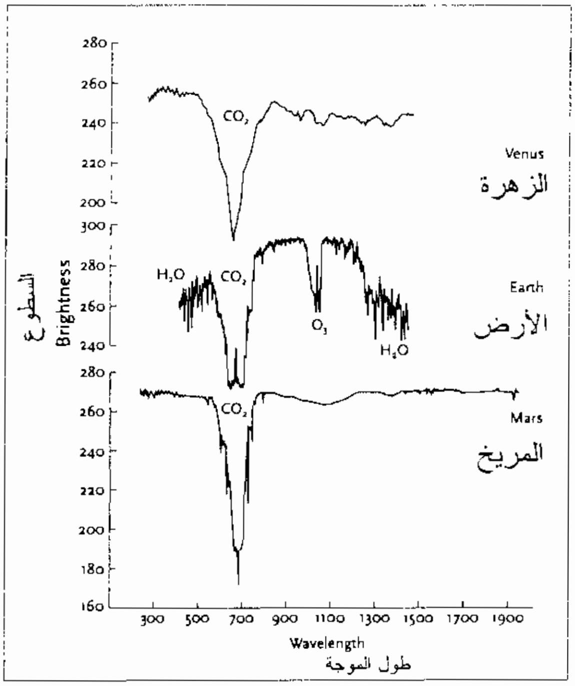
قوبلت فكرة أن الحياة ذاتها جزء لتنظيم البيئة الفيزيائية برفض شديد من قطاعات عديدة من البيولوجيين وغيرهم، ومازالت فكرة «الجايا» لا تلقى ترحيبا فى كثير من الأوساط العلمية وخاصة من نواح دينية، لم يدّع لوفلوك أية انعكاسات دينية لنموذج «الجايا» – كل ما قاله بأن الحياة بذاتها جزء من المنظومة الفيزيائية والبيولوجية وكما تتأثر الحياة بالتذبذبات الفيزيائية، فهى أيضا تؤثر على البيئة الفيزيائية، وأصبحت عامل استقرار أساسى للبيئتين – بل ومن المدهش أن لوفلوك كان قد بدأ التفكير فى منظومة «الجايا» حتى قبل أن تتبلور النظريات الحالية عن الشواش والاتزان.

لنعطى مثالين عن مدى صحة نموذج «الجايا»: المثال الأول يرتبط بما يسمى عالم زهور اللولوية(*) وهى لغز قدمه ساجان للوفلوك واعتبره لوفلوك أكبر اختراع فكرى قام به». ينبنى اللغز على ما يسمى «معضلة الشمس الشابة» والذى يعتبر الآن بفضل لوفلوك ليس لغزا على الإطلاق. من نتائج الأبحاث فى فيزياء الطاقات العالية وغيرها توصل العلماء إلى أن الشمس فى شبابها كانت تشع طاقة أقل بمقدار ٣٣ – ٤٣٪ من الطاقة التى تشعها فى الوقت الحاضر، وكانت أبرد بمقدار ٢٥ – ٣٠٪ فى ذلك الوقت. واللغز الآن لماذا ورغم ازدياد الإشعاع الشمسى بمقدار ٤٠٪ لم تتبخر المياه على الأرض وتجف الأرض وتنتهى الحياة على مدى ٤,٥ بليون سنة.

ليست هناك مشكلة لتفسير لماذا لم تكن الأرض كرة مجمدة عندما كانت الشمس باردة كما هو الحال على المريخ والزهرة، فإن الغلاف الجوى للأرض كان مكونا من ثانى أكسيد الكربون وبخار الماء، وهما الغازان اللذان يمتصان حرارة

(*) وهى زهور جميلة ذات أوراق كبيرة (زهور عباد الشمس).

الشمس ويمنعان تسرب الحرارة مرة أخرى إلى الفضاء الخارجى، أى يحبسان الحرارة فى الغلاف الجوى، وهى الظاهرة المعروفة «بالاحتباس الحرارى».



شكل (٧-١): يبين الشكل الانخفاض فى وهج الأغلفة الجوية للأرض، الزهراء والمريخ واضح منها وجود نسبة ضئيلة من ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى للأرض.

فى شكل ٧-١ واضح أنه توجد نسبة صغيرة من ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى للأرض . ينعكس كل هذا ويصبح واضحا تماما عندما نقارن درجات الحرارة المتوسطة للكواكب الثلاثة والقمر. إن درجة الحرارة المتوسطة لسطح القمر هى - ١٨° مئوية، على الأرض هى ١٥° مئوية، الفارق هو ٣٣° وهذا بسبب وجود ٠,٠٣٥٪ من ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى، يضاف إلى ذلك بخار الماء وآثار ضئيلة من الميثان وكلها غازات تسبب ظاهرة الاحتباس الحرارى. يؤكد كل هذا أن الأرض لم تتجمد أبدا حتى عندما كانت الشمس خافتة، وكذلك لم تكتو الأرض عندما كبرت وإنما احتفظت بدرجة حرارة متوسطة على مدى خمسة بلايين سنة حتى مع ازدياد سخونة الشمس.

لقد اقترح كارل ساجان عدة تصورات لما يمكن أن يحفظ درجة حرارة الأرض ثابتة إلى حد ما، ولكن كانت كلها غير مبررة عدا أنها محاولات نظرية لتفسير حقيقة معروفة. كان كل ذلك حتى قبل أن يبدأ لوفلوك التفكير فى هذا الموضوع

وقبل أن يُدخل إلى العلم مفهوم «الجايا» . بالطبع كان لابد من البحث عن وسيلة لخفض غازات الاحتباس الحرارى مع ازدياد حرارة الشمس. إن أول عملية بناء ضوئية كشكل من أشكال الحياة على الأرض هى «البكتريا غير الهوائية» (Anaerobic Bacteria) التى تمتص ثانى أكسيد الكربون من الجو وتطلق غاز الميثان، وهو أيضا غاز احتباس حرارى ولكن فى منطقة أخرى من الطيف. عندما تكون البكتريا نشطة يزاح الاتزان نحو الميثان، وعندما تكون غير نشطة يزاح الاتزان نحو ثانى أكسيد الكربون.

حتى يمكن أن تكون الأحداث متسقة، كان لابد من إدخال تغذية خلفية فى هذه الحسابات . هنا وضع لوفلوك تصورا عن كون البكتريا أنشط ما يمكن عند درجة حرارة ٢٥°م، وأقل نشاطا إذا زادت أو نقصت درجة الحرارة، وغير نشطة تماما إذا انخفضت درجة الحرارة عن الصفر المئوى أو زادت عن ٥٠°م. هكذا يمكن أن تثبت درجة الحرارة لأول بليون سنة . عندئذ يمكن أن تبدأ أشكال الحياة التى تطلق أكسجينا فى الجو فيتفاعل الأكسجين مع الميثان ويخرجه من المشاركة الشبكة ، ويتبع ذلك انخفاض فى نسبة ثانى أكسيد الكربون. لكن كان نقاد هذا التصور كثيرون، ولهم الحق؛ فالصورة تبدو اصطناعية وتحتاج للكثير من الحظ.

هنا تقوم لوفلوك بنموذج زهور اللولوية فى الثمانينيات من القرن الماضى وشارك عديد من العلماء معه فى تطوير هذا النموذج، وحتى كانت فكرة لعبة الحاسب المسماة «لعبة الأرض» (Sim Earth) التى ظهرت فى التسعينيات فى عام ١٩٨١م توصل لوفلوك إلى التصور الأول «للجايا» وقدمها فى مؤتمر علمى فى هولندا فى عام ١٩٨٢م، وذكر إسهام أندريو واتسون (Anderew Watson) فى وضع برنامج حاسوبى نشر فى مجلة تيلوس (Tellus) فى عام ١٩٨٣م. يبدأ عالم دايزى بكوكب مثل الأرض (وعلى نفس المسافة من الشمس) ليست به أية حياة. فى البداية يكون الكوكب كله أرض لتنمو الزهور اللولوية، كما أن تركيب الغلاف الجوى ثابت حتى يكون الاحتباس الحرارى ثابتا. للزهور المذكورة لونان - أبيض وأسود وتزدهر عند درجة حرارة ٢٠°م، يقل ازدهار هذه الزهور إذا قلت درجة الحرارة عن ٢٠°م وتتوقف عن النمو عندما تقل درجة الحرارة عن خمس درجات مئوية، كما أنها يقل نموها إذا زادت درجة الحرارة أيضا وتتوقف عندما تزيد درجة الحرارة عن ٤٠°م، فتبدأ الأحداث مع نمو حرارة الشمس وعندما تصل درجة حرارة الكوكب عند خط الاستواء إلى ٥°م فتبدأ الزهور فى النمو والتكاثر بحيث تتكاثر الزهور البيضاء لتنبت زهورا بيضاء والسوداء لتنبت زهورا سوداء. هنا ستمتص الزهور السوداء قدرا أكبر من إشعاع الشمس وتدفئ الأرض من حولها، وأما البيضاء فسوف

تبرد الأرض حولها ، وفى هذه الحالة تكون الزهور السوداء ذات ميزة نسبية وترتفع درجة حرارة الأرض حتى بمعدل أسرع من معدل ازدياد درجة حرارة الشمس وتزداد الرقعة المغطاة بالزهور السوداء. عندما تصل درجة الحرارة إلى ٢٠°م فى أى بقعة على هذا النموذج للأرض، تبدأ الزهور البيضاء فى الازدهار، حيث إنها أصبحت فى وضع متميز مما يساعد على حفظ درجة الحرارة قرب معدلها الأفضل. فى هذه الحالة يزيد انتشار الزهور البيضاء على حساب الزهور السوداء حتى تغطى الزهور البيضاء كل سطح الأرض. مع ازدياد درجة حرارة الشمس تجد الزهور البيضاء صعوبة فى الحياة، وعندما تصل درجة الحرارة ٤٠°م تموت كل الزهور . يتغير فى هذا النموذج معدل الطاقة التى تشعها الشمس من ٦٠٪ إلى ١٤٠٪ من معدلها الحالى.

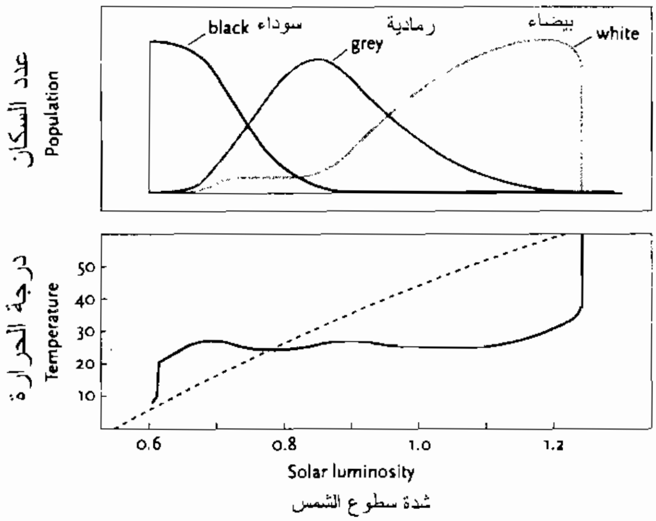
مما سبق نرى أنه رغم ازدياد طاقة الشمس ووجود نوعين فقط من الزهور وبقواعد بسيطة نرى أن درجة حرارة الأرض تظل حول المستوى المناسب دون أن نفترض أن الزهور البيضاء مثلا تضحى بشىء ما لحساب الزهور السوداء والعكس بالعكس. على العكس كل نوع يحاول أن يستغل الظروف لصالحه هو فقط.

ولكن هل الطبيعة تعمل هكذا فعلا؟

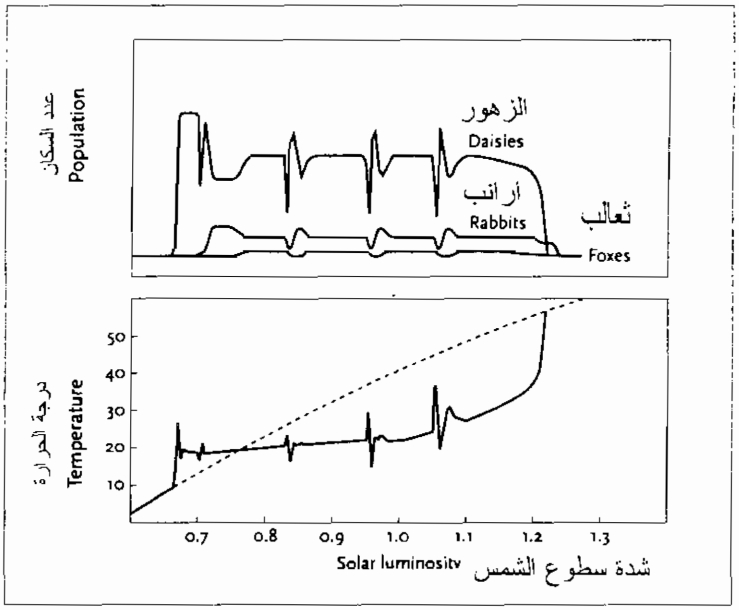
بعض نقاد هذا النموذج يقولون إن الزهور عديمة اللون سوف تقتنص الفرصة وتقضى على الزهور البيضاء والسوداء فى عملية يمكن أن نسميها بالخداع الطبيعى لذا أضاف لوفلوك عنصرا جديدا وهو الزهور عديمة اللون، ومقابل ذلك تدفع الزهور البيضاء والسوداء واحدا بالمائة من طاقتها لاكتساب اللون، وهذا يخفض من معدل نموها بالنسبة للزهور عديمة اللون. عندئذ تكون الزهور عديمة اللون متميزة عندما يكون وهج الشمس مناسبا لكى تكون درجة حرارة الأرض عند مستوى ٢٠°م. فى النهاية تظل درجة حرارة الأرض ثابتة رغم ازدياد درجة حرارة الشمس.

ثمة نقد آخر لهذا النموذج وهو أنه لا يسمح للزهور أن تتطور. هنا أضاف لوفلوك زهور رمادية، ليس لها تأثير على درجة الحرارة ولكن سمح لها أن تطفر بشكل عشوائى، إما أن تكون أكثر أو أقل رمادية، وذلك مع كل جيل جديد.

يمكن أيضا أن يتحسن هذا النموذج بإضافة حيوانات تتغذى على هذه الزهور وأيضا يضاف حيوانات مفترسة تفترس الحيوانات السابقة. توصل إلى هذا النموذج «ألفريد لوتكا وفولتيرا (كما سبق فى الباب الرابع) وكان أول من تنبه إلى أن العلاقة بين الحيوانات المفترسة وفرائسها تؤدى إلى علاقة وثيقة بين البيئتين الفيزيائية والبيولوجية.



شكل (٧-٢): يبين الشكل العلوى كيف تتغير نسبة الزهور البيضاء والسوداء والرمادية مع ازدياد درجة حرارة الشمس، وفى الشكل السفلى يظهر كيف أن درجة حرارة الكوكب تظل شبه ثابتة.



شكل (٧-٣) يبين الشكل حدوث أربع كوارث عندما تقضى الأرانب على ٣٠٪ من الزهور وتقضى الثعالب على ٣٠٪ من الأرانب . مع كل هذا تبقى درجة حرارة الكوكب ثابتة. يبين الخط المنقط ازدياد درجة الحرارة فى غياب الزهور (والأرانب والثعالب).

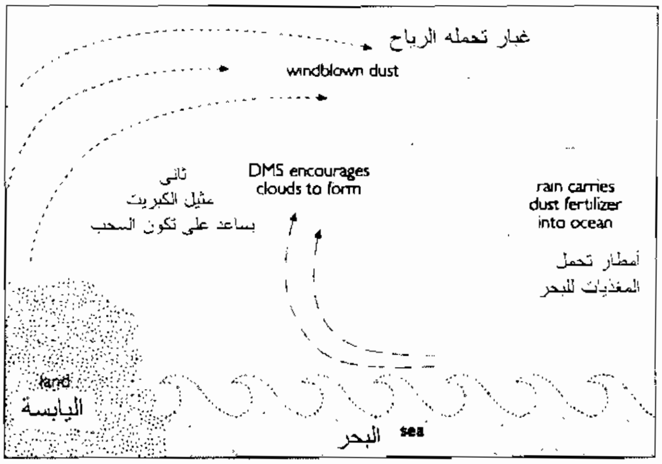
يبين هذا النموذج ما يمكن حدوثه، ولا يمكن أن يجزم أن كل هذا حدث بالفعل، حيث أن درجة حرارة الكوكب تعتمد على تغير خواص الغلاف الجوى بالنسبة لامتصاص الأشعة تحت الحمراء. يظل دور الزهور هنا تغذية خلفية تتحكم فى تغيرات درجة حرارة الكوكب. عندما تزدهر المياه على الأرض تقل نسبة ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى والعكس صحيح، ماذا سيحدث عندما يختفى ثانى أكسيد الكربون؟ سوف ترتفع درجة حرارة الأرض وتنتهى الحياة، وربما يحدث أن تتكون سحب كثيفة تمنع حدوث ذلك، حيث إنها ستعكس معظم الطاقة الآتية للأرض إلى الفضاء الخارجى مرة أخرى. ورغم أن اكتشاف «الجايا» هو ما يعتبر أعظم اكتشاف للوفلوك، لكن هو نفسه يعتبر أن أعظم أعماله هو التوصل إلى العلاقة بين غطاء السحب حول الأرض والنشاط البيولوجى فى المحيطات. إن ما حدث مع «الجايا» فى منتصف الثمانينيات هو تحول «الجايا» من مجرد فرضية إلى نظرية متكاملة.

فى السبعينيات كان لوفلوك مهتما بدراسة كيفية انتقال الكبريت من المحيطات إلى الأرض وذلك قبل أن تتبلور أعماله عن الجايا، وحتى قبل أن يخلع وليم جولدنغ عليها هذا الاسم. الكبريت عنصر أساسى للحياة، وينساب مع مياه الأنهار على شكل مركبات كبريت إلى مياه المحيطات، وهكذا تفقده اليابسة. إذن لابد وأن تكون هناك ميكانيكية أخرى لإعادته إلى اليابسة. كان الاعتقاد سائدا بأن الكبريت يخرج من الحياة على شكل غاز كبريتيد الأيدروجين، وهو الغاز المميز الذى يعطى رائحة البيض الفاسد. لم يقتنع لوفلوك بهذا، حيث أن هذا الغاز يتكسر فى مياه المحيطات نظرا لوجود أكسجين ذائب فى هذه المياه. كان لوفلوك يعلم أنه فى جامعة ليدز (University of Leeds) توصل الباحثون إلى أنه فى مياه المحيطات تقوم الكائنات الحية بإطلاق غاز ثانى ميثيل الكبريتيد (Dimethyle -Sulfide) . وهكذا صمم لوفلوك جهازا حساسا لقياس نسبة هذا الغاز فى الهواء الجوى. ووضع هذا الجهاز على سفينة شاكلتون (Shakelton) التى قامت برحلة من بريطانيا، إلى القطب الشمالى وعادت مرة أخرى إلى بريطانيا، وذلك فى عام ١٩٧٢م. حملت هذه السفينة أجهزة أخرى بناها لوفلوك لقياس تأثير مركبات الكلوروفلور وكربونات على ثقب الأوزون. لم يتأكد هذا إلا بعد عشر سنوات، حيث أجريت قياسات أخرى أثبتت مما لا يدعو للشك أن الكائنات البرية تطلق فعلا غاز ثانى كبريتيد الميثيل إلى الهواء الجوى، والذى يذوب فى مياه الأمطار ويعود إلى الأرض مرة أخرى.

لا تفعل الكائنات البحرية هذا للحفاظ على اتزان البيئة على الأرض وإنما تفعل ذلك من أجل الحفاظ على ظروف حياتها هى، حيث إنها بذلك تمنع كلوريد الصوديوم من النفاذ عبر جدران خلاياها فيدمرها. يتم ذلك عن طريق تولد ضغط عال بواسطة مكون غير سام لا يؤثر على الأحماض الأمينية داخل الخلية . تستخدم الكائنات البحرية مركبا اسمه دايمثيل سلفونوبروبيونات - (Dimethyle sulfono propionate) له كل الخواص الكيميائية المطلوبة. إن استخدام الكبريت كمادة أساسية فى هذه العمليات تمليه ظروف كونية موجودة بكثرة فى المياة المالحة. عندما تموت الطحالب أو تؤكل – ينبعث منها غاز كبريتيد الميثيل الثنائى إلى الهواء الجوى. ولكن ما علاقة ذلك بالجايا والتحكم فى الطقس على الأرض؟

فى عام ١٩٨٦م كان لوفلوك يزور جامعة واشنطون فى سياتل وقابل روبرت كارلسون (Rebert - Carlson) وفوجئ بقوله أنه حتى ذلك الحين لا يعرف سبب تكون السحب فوق المحيطات. نزول المطر يسهل تفسيره حيث تتكون قطرات كبيرة من الماء تحت تأثير برودة الطبقات العليا من الجو وهى مشبعة ببخار الماء فتسقط هذه القطرات على شكل أمطار، أما تكون السحب فهذا شىء آخر – يلزم لهذا تكون قطرات دقيقة من الماء حول نويات تكثف (تسمى بنويات تكثف السحب) وتسبح هذه القطرات فى الهواء. توجد فوق الأرض توجد أنواع عديدة من هذه النويات مثل جسيمات الدخان وأخرى ناجمة عن النشاطات الإنسانية. أخبر كارلسون لوفلوك إنه بتحليل الهواء فوق المحيطات وُجدت وبكثرة مثل هذه النويات ولكنها قطرات من حامض الكبريتيك وكبريتات النشادر. لم يكن كارلسون يعلم من أين تأتى هذه القطرات من حامض الكبريتيك وكبريتات النشادر إلى أن سمع لوفلوك يتحدث عن دورة الكبريت بين المحيطات والبسيطة ، حيث يتأكسد غاز ثانى كبريتيد الميثيل ويتحول إلى نويات تكثف للسحب.

أهمية هذه الدورة واضحة حيث، إنه بدون السحب كانت درجة حرارة الأرض ستصل إلى ٣٥°م، أى أعلى بعشرين درجة من معدلها الحالى.



شكل (٧-٤): إحدى الدورات التى تعضد فرضية «الجايا» ، حيث تتفاعل العمليات الحية وغير الحية بشكل يحفظ النظام ذاتيا.

وحيث إن المحيطات تغطى سبعين بالمائة من سطح الكوكب فإن مياه المحيطات المعتمة مناسبة لامتصاص قدر كبير من طاقة الشمس بدون سحب فوق المحيطات، وكان العالم سيصبح دافئا بشكل غير مريح. كل هذا يعنى أن أشكال الحياة الميكروسكوبية فى المحيطات تلعب دورا هاما للتحكم فى طقس الأرض. إذا زاد نشاط الحياة البيولوجية البحرية ، يزيد غطاء السحب فوق المحيطات، مما يقلل ضوء الشمس الضرورى لعمليات البناء الضوئى وينخفض النشاط البيولوجى، وعندما ينخفض النشاط البيولوجى يقل انبعاث غاز ثانى كبريتيد المثيل وتقل السحب المتكونة ويزداد الضوء اللازم للبناء الضوئى وتزدهر الحياة وهكذا. هذا كما نرى يماثل نشاط الزهور الذى يؤثر على مكونات الشبكة الممثلة لأوجه الحياة على الأرض.

لقد كتب لوفلوك عدة كتب عن الارتباطات المختلفة بين أوجه الحياة على الأرض . الفكرة أنه بعيدا عن الشواطئ لا تحوى المحيطات موادا مغذية كافية لكى تزدهر الحياة البحرية، وبالقرب من الشواطئ، على العكس هناك الكثير من الغذاء حتى تزدهر الحياة البيولوجية فى المياه.

إن غاز ثانى كبريتيد الميثيل يعمل على تنشيط الحياة البيولوجية فى المحيطات (نظرا لكونه يمثل نويّات لتكون السحب) بطريقتين: الأولى أنه عند تكوين غطاء سحب أكبر تصبح الرياح أكثر عنفا، ويساعد هذا على إحداث تيارات مائية كبيرة. تحمل المغذيات من قاع المحيطات العميق إلى السطح حيث يتم التمثيل الضوئى. ثانيا وربما كان هذا هو الأهم - يؤثر ذلك على الغبار الذى يأتى من القارات، والذى ينتقل خلال طبقات الجو العليا إلى مسافات بعيدة تصل إلى أقصى مناطق المحيطات

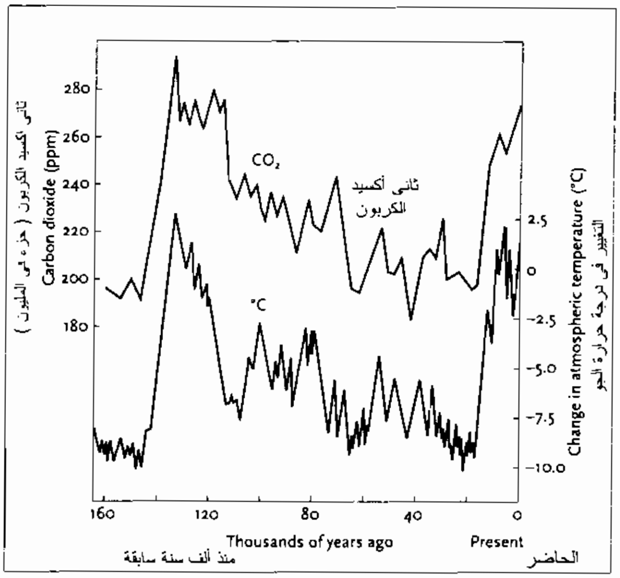
البعيدة، فمثلا غبار الصحراء وُجد فى جبال الإنديز ، وغبار من قلب القارة الأسيوية يصل إلى هاواى بشكل روتينى. هذا الغبار غنى بالمغذيات الضرورية للحياة، وإن كانت لا تصلح لأن تكون نويات لتكون السحب. ولكن غاز ثانى كبريتيد الميثيل الذى تطلقه الطحالب هو السبب فى تكوين السحب وهطول الأمطار. ويأخذ هذا الغبار إلى أسفل حيث تغذى الطحالب. وهكذا نرى أن هذه الدورة تخدم الحياة على الأرض وفى المحيطات مما يجعل النظام كشبكة تنتظم ذاتيا.

كل هذا يصف الوضع الحالى، ولكنه يساعدنا على فهم ما يمكن أن يحدث فى المستقبل، وكذلك ما حدث فى الماضى.

عبر ملايين السنين السابقة توالت عصور جليدية بشكل منتظم يبلغ مداها حوالى مائة ألف سنة، يتلوها فترات دافئة تسمى «العصور بين الجليدية» والتى تمتد من عشرة إلى خمسة عشر ألف سنة. نعيش الآن فى فترة «العصر بين – الجليدى». تتوافق هذه الدورات مع دورات تذبذب مدار الأرض حول الشمس. كمية الحرارة التى تصل للأرض من الشمس ثابتة، ولكننا نلاحظ تفاوتا كبيرا بين الفصول (صيف ساخن وشتاء بارد) وأحيانا يقل التفاوت (صيف بارد وشتاء دافىء) كل هذا لا يفسر الانتقال من العصور الجليدية إلى العصور ما بين الجليدية، فلابد أن يكون هناك عامل آخر أكبر تأثيرا.

عندما يقل ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى تبرد الأرض والعكس صحيح، وهناك توافق تام بين نسبة ثانى أكسيد الكربون ودرجة حرارة الأرض. منذ آلاف السنين توفرت فى طبقات الجليد المتراكمة فى منطقة المحيط المتجمد الشمالى وفى جرينلاند. لقد قامت محطة ڤوستوك الروسية قرب القطب الشمالى بدراسة طبقات جليد تغطى مائة وستين ألف عام، وهذا كافية لتغطية كل الفترة منذ أحدث عصر جليدى.

أمكن تصنيف طبقات الجليد بالطرق الجيولوجية المعتادة والكشف عن فقاعات الهواء المدفونة بها، وأمكن الكشف عن درجات حرارة هذه الطبقات فى حينها بقياس نسبة الماء الثقيل فى هذا الجليد، وكشفت هذه الدراسات أنه خلال العصور الجليدية كانت درجة حرارة الأرض أقل بتسع درجات مئوية، وفى العصور الدافئة كانت درجة الحرارة أعلى بدرجتين مئويتين فقط. كما نرى من شكل ٧ – ٥ فإن تذبذبات درجة الحرارة تحاكى تماما تذبذبات ثانى أكسيد الكربون فى الغلاف الجوى حينذاك.



شكل (٧-٥) : مع تحول الأرض من العصور الجليدية إلى العصور الدافئة نرى كيف تتطابق تذبذبات درجة الحرارة مع نسبة ثانى أكسيد الكربون فى الجو.

والسؤال الآن ما الذى يغير نسبة ثانى أكسيد الكربون فى الجو؟

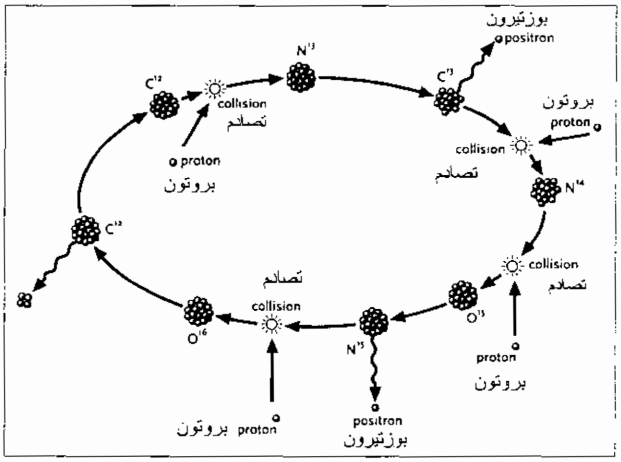
قام كل من جون مارتن (John Martin) وستيف فيتسواتر (Steve Fitzwater) فى الثمانينيات فى مختبرات محطة موس لاندغ (Moss Landing) البحرية فى كاليفورنيا وبناء على اقتراح من مارتن أن الحديد هو السبب الرئيسى فى ذلك. كان العالمان يعلمان بأن منطقة المحيط المتجمد الشمالى وشمال المحيط الهادى تحوى مياها غنية بالمغذيات من أملاح الفوسفات والنيترات. رغم ذلك فإن البلانكتون كان محتاجا للحديد حتى يتغذى على هذه المركبات، حيث إن الحديد مكون أساسى للكلورفيل. أجرى العالمان تجربة أخذوا فيها عينات من مياة شمال المحيط الهادى وأضافا أملاح الحديد ولاحظوا ازدياد نشاط البلانكتون فى هذه المياه عند إضافة أملاح الحديد .

المهم هنا أن هبوب الرياح التى تحمل الغبار من اليابسة إلى المحيطات «تسمد» هذه المحيطات، وتتأثر هذه العملية عندما تبرد الأرض وتقل الأمطار التى تحمل الغذاء للمحيط، وتزداد كمية هذه المغذيات إذا حدثت تذبذبات فلكية تزيح الاتزان الحرارى للأرض فى اتجاه عصر جليدى.

ثمة عامل آخر، وهو دور حامض سلفونى الميثان والذى لابد وأن تعلو نسبته فى الأمطار أو الثلوج خلال العصور الجليدية. أثبتت الدراسات فعلا ازدياد نسبة هذا الحامض من ثلاثة إلى خمسة أضعاف نسبته فى هذه الأيام . وهكذا نرى أن

البيئتين الفيزيائية والبيولوجية تكونان شبكة واحدة ذاتية التحكم والانتظام. يعطى كل هذا أداة للحكم على وجود أو عدم جود حياة على الكواكب الأخرى مثل المريخ .

إن قصة ظهور الحياة فى الكون شيء آخر - ومثال جيد أيضا على تعقد سطحى يعتمد على بساطة عميقة، هناك أدلة قاطعة على أن الكون بدأ «بالانفجار العظيم» - منذ أربعة عشر بليون سنة. نتج عن هذا الانفجار العظيم القوالب الأساسية للكون، وهى الايدروجين والهيليوم بنسبة ٣ : ١، تكونت بعد ذلك العناصر الخفيفة داخل النجوم نفسها وانطلقت إلى الفضاء عند انفجار هذه النجوم جزئيا أو كليا. فى الشمس تتولد الطاقة نتيجة اندماج ذرات الايدروجين ويتكون الهيليوم فى النجوم الأخرى. تندمج نويات الهيليوم لتنتج ذرات عناصر تحوى مضاعفات الأربعة، مثل الكربون (١٢)، الأكسجين (١٦) والنيتروجين (١٤) رغم أنه ليس من مضاعفات الأربعة والذى يتكون كناتج جانبى فى تفاعلات الأكسجين والكربون فى نجوم أكبر بكثير من الشمس. حيث أن الهيليوم عنصر خامل فإن أكثر العناصر انتشارا فى الكون هى الكربون، الأيدروجين، الأكسجين والنيتروجين، وتعرف اختصارا بـ (CHON) . بالطبع الكربون هو أكبر العناصر تفاعلا، حيث إنه يمكن أن يرتبط بأربع ذرات أخرى، إما من الكربون أو غيره من العناصر ، وهكذا تتكون سلاسل طويلة من هذا العنصر . تسمى هذه المركبات بالمركبات العضوية؛ لأنها أساس الحياة على الأرض، ولذا تسمى الحياة على الأرض الحياة المبنية على الكربون، فعلا يحوى معظم الغبار الكونى الموجود بين الكواكب على مركبات عديدة يدخل فى تركيبها الكربون.



شكل (٧-٦): التفاعلات النووية داخل النجوم التى تربط عناصر الكربون، النيتروجين والأكسجين مع الأيدروجين.

ولهذا الأمر يمكن القول بأنه لو وُجدت حياة فى مكان آخر فى الكون فمن الأرجح أن تكون أيضا مبنية على العناصر (CHON) .

من الدراسات الطيفية للسحب الموجودة بين النجوم ثبت وجود الميثان وثانى أكسيد الكربون وحتى بعض المركبات العضوية المعقدة مثل الفورمالدهايد والكحول الايثيلى، وحتى على الأقل حامض أمينى واحد مثل الجلايسين. بناء على هذه المشاهدات قام فريقان من العلماء وبإجراء بعض التجارب لاختبار احتمالية تكون أحماض أمينية فى ظروف مثل تلك التى بالكون، وضع الباحثون مخلوطا من الماء، الميثانول ، النشادر وسيانيد الأيدروجين، وضعوه فى إناء محكم عند درجة حرارة منخفضة جدا (– ٢٥٨°) وعرضوه لإشعاع فوق بنفسجى. فى عام ٢٠٠٢م تم نشر نتائج هذه الأبحاث وتأكد تكون أحماض أمينية وتحديدا الجلايسين ، السيرين والآلاثين . وجود هذه الأحماض الأمينية يؤدى إلى ظهور بروتينات فى منظومة ذاتية تعطى فرصة لبدء الحياة، أو كما يعبر دارون عن ذلك «فى هذه البركة الدافئة تأتى الفرصة لكى تنظم نفسها فى منظومة حية».

لـقد درس لى سمولين (Lee Smolin) من جامعة واترلو University of Waterloo فى أونتاريو كيف يتجمع الغبار ليكون نجوما جديدة. إن درب التبانة هو بيتنا فى الكون، ولكن يوجد مثله مئات آلاف البلايين من المجرات. تتكون المجرة من مئات البلايين من النجوم، وهى على شكل قرص يبلغ قطره ألف سنة ضوئية. كثافة المادة قرب مركز المجرة أعلى بكثير عن كثافتها عند الأطراف، مما يجعل المجرة تبدو على شكل بيضة هائلة ذات صفار كبير. أقرب مجرة لنا هى مجرة الأندروميدا. يبلغ عمر مجرتنا عشرة بلايين سنة، وتستغرق الشمس ٢٥٠ مليون سنة لكى تكمل دورة واحدة حول مركز المجرة، لذا فكل العمليات التى تتم داخل هذه المجرات وبينها تبدو بطيئة للإنسان لكنها تبدو سريعة جدا بالنسبة للمجرات نفسها. ثمة نقطة أساسية أخرى وهى أن النجوم متباينة فى الحجم والأهم فى الكتلة. النجوم ذات الكتل الهائلة تحترق أسرع وتتحول إلى سوبرنوفا (Supernova) ولكن عدد هذه النجوم قليل، ففى المتوسط هناك انفجاران من هذا النوع كل قرن. إن الأذرع اللولبية والتى تمثل سمة مميزة لما يسمى بالمجرات الحلزونية واضحة نظرا لأنها تحوى العديد من النجوم الثقيلة والساخنة والتى تتوهج بشدة.

يدل هذا على أنها نجوم شابة نظرا لعدم وجود نجوم ثقيلة عجوزة . يعنى هذا أن هذه النجوم تكونت حيث هى الآن. «إن الأذرع الحلزونية المضيئة تبدو مثل الأنوار التى تعلق على شجرة عيد الميلاد»، هكذا يصف سمولين هذه الأذرع.

الشكل الحلزونى يظل محتفظا بهذا الشكل نظرا لأن السحب الكثيفة تتجمع

لتكون نجوما على شكل عنقودى. إن الإشعاع فوق البنفسجى الذى يصدر عن النجوم الساطعة يكون فقاعات فى السحابة ويوقف تكون نجوم أكثر. عندما تنتهى دورة حياة النجم وينفجر، تنتشر موجة ضغط عال فى السحابة وهذه بدورها تنضغط وتنهار لتبدأ موجة ثانية وهكذا. اتضح من برنامج محاكاة حاسوب أنه توجد كثافة مثالية للسحب بحيث تبدأ عملية الانفجار والانهيار وتكون نجوم جديدة ،وهكذا بشكل مستمر دون انقطاع. إذا كانت كثافة السحابة أعلى فإن الإنفجار سوف يؤدى إلى تكون نجوم عملاقة ذات دورة حياة قصيرة وتتناثر المكونات فى الفضاء الكونى، ويكون الجيل الثانى من السحب رقيقا. إذا كانت الكثافة أقل فسوف تتكون العديد من النجوم والعديد من الموجات الصدمية والتى سوف تدفع النظام إلى كثافة أكبر. يدور باطن المجرة بسرعة ٢٥٠ كيلو متر/ثانية، أما الأذرع فتدور بسرعة ٣٠ كيلو متر/الثانية مما يعنى أن باطن المجرة يشد الأذرع معه فى حركته، وبالتالى يضغط عليه، وكل جزء فى المجرة يمر بوضع الانضغاط مرتين فى الدورة والتى تستغرق مائة مليون سنة.

بعيدا عن هذا النشاط تحوى المجرة نجوما مستقرة كالشمس وتجمعات من الغاز والغبار، كذلك توجد سحب من الغازات الباردة والغبار التى تتكون منها النجوم والكواكب. كذلك توجد تجمعات هائلة من الغازات وأخرى من غازات متأينة والتى تسمى بالبلازما، هكذا نرى أن المجرات ككل ليست فى حالة اتزان مستقر، فهى تحوى مناطق منخفضة الكثافة وأخرى أكثر كثافة – ولكن كلها أقل كثافة من الهواء الجوى بعدة ملايين من المرات.

مما سبق نرى أن مجرة التبانة وغيرها من المجرات الحلزونية هى مناطق تناقص الأنتروبية. إنها منظومة بعيدة عن الاتزان؛ نظرا لانسياب الطاقة الهائلة إليها، وبسبب التغذية الخلفية كما وصفنا سابقا . هكذا نرى أن المجرات تجتاز اختبار لوفلوك، بل ويعتبرها سموليين نظما حية . لابد من توخى الحذر هنا؛ لأن اختبار لوفلوك هو شرط ضرورى ولكن ليس كافيا لوجود حياة. من كل هذا نرى أنه لا يوجد شيء غير طبيعى أو خاص بالنسبة للحياة فى هذا الكون . كما رأينا أنه من الطبيعى للنظم البسيطة أن تنظم نفسها بنفسها ذاتيا فى شبكات على حافة الشواش، وبالتالى يمكن أن تظهر فيها الحياة فى أى لحظة – فى «هذه البركة الدافئة». إنها جزء من سلسلة متصلة من العمليات لا تمثل الحياة فيها أية قفزة، ومن وجهة النظر هذه، أهم شيء بالنسبة للعلم هو اكتشاف حياة فى مكان آخر فى الكون – مكان واحد على الأقل . فى المستقبل القريب خلال عشرين أو ثلاثين سنة يمكن للتلسكوبات المحمولة فى الفضاء أن تكتشف مثل هذه الكواكب.

باستخدام ظاهرة دوبلر للأشعة الضوئية الصادرة من الشمس، ووجد أن الشمس

تتذبذب فى مدارها ويمكن أن تبعد بمقدار ثمانمائة ألف كيلو متر عن مدارها الأصلى وبسرعة ضئيلة جدا، كذلك تؤثر حركة الأرض على الشمس بحيث يمكن أن تتحرك مسافة قدرها ٤٥٠ كيلو متر عن مدارها، ولا توجد طرق حتى الآن لقياس مثل هذه الإزاحة الضئيلة. ورغم وجود تقنيات أخرى إلا أن تقنية دوبلر(*) هى الأفضل، وسوف تنطلق أقمار صناعية تجوب الفضاء باستخدام هذه التقنيات للتحقق من صحة هذه التصورات. عند اكتشاف حياة ما على كوكب ما، سوف يبدأ البحث عن نوع «الجايا» على هذا الكوكب.

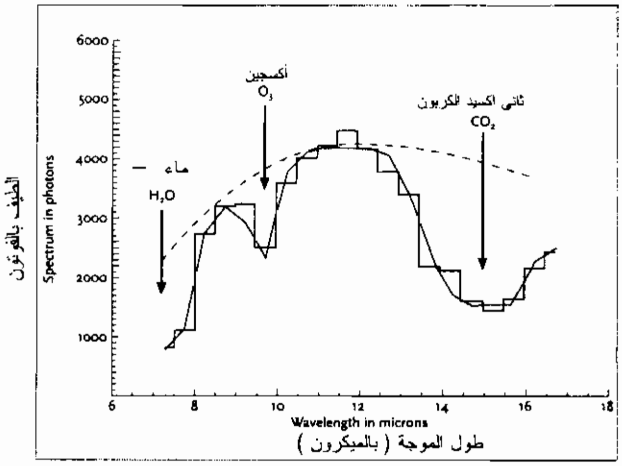
من أفضل المشاريع المستقبلية للبحث عن حياة على كوكب آخر هو مشروع القمر الصناعى الأمريكى المسمى سيم (SIM) أى (Space Interferometry Mis-sion) - ((المهمة الفضائية التداخلية)، وسوف يطلق هذا القمر خلال العامين القادمين. سوف يتمكن هذا القمر وبتقنية التداخل من قياس أى تذبذبات فى مدارات الكواكب وخاصة تلك التى تدور حول شموس فى المجرة وبدقة عالية. أيضا سوف تقوم وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) بإطلاق قمر صناعى اسمه «جايا» وإن كان المسمى يسبب لبسا، لكنه ليس للبحث عن «جايا» وإنما لرصد مدارات آلاف من النجوم فى المجرة وللبحث عن كواكب مثل المشترى والأرض. هذه بداية فقط لأنه إذا رصدت مثل هذه الكواكب، فلابد من إجراء قياسات طيفية لها، ولكن هذا سوف يتم فى مرحلة لاحقة، وربما يحتاج ذلك إلى تضافر جهود دولية لعدة دول حتى يمكن تغطية تكلفة هذا المشروع.

من الأمور المدهشة أن البحث عن الحياة على كواكب أخرى سوف يحتاج لتطوير معدات حساسة جدا،ومعنى ذلك أنها كبيرة جدا لرصد الأشعة تحت الحمراء، لأن الكوكب المأهول سوف يشع أشعة تحت الحمراء بشكل يفوق كل الكواكب التى حوله؛ نظرا لوجود غلاف جوى يمتص هذه الأشعة ويظهر الكوكب فى الصور المأخوذة بالأشعة تحت الحمراء كوكبا ساطعا مميزا عن كل الكواكب حوله.

هناك خطة لإطلاق ستة أقمار صناعية يحمل كل واحد منها تلسكوب يعمل بالليزر، وتجمع الاشارات من كل تلسكوب وترسل للأرض لمعالجتها من بعد يصل إلى ٦٠٠ مليون كيلو متر. سيستغرق هذا المشروع ست سنوات، السنتان الأوليان مخصصة لرصد أكبر عدد من هذه النجوم، فى السنتين التاليتين سيتم التركيز على أفضل ثمانين نجما مرشحة للدراسة التفصيلية، وبعد ذلك تتم دراسة الإشعاع الحرارى لعشرين من هذه الكواكب . من المهم أن نذكر أن البحث هنا سوف يتم

(*) ظاهرة دوبلر هى تغير تردد المصدر بالنسبة للكاشف مع تغير سرعة حركة المصدر - وكذلك مع تغير حركة الكاشف أو كليهما.

ليس عن الأكسجين العادى ثنائى الذرة – لأنه لا يظهر فى أية دراسة طيفية للأشعة تحت الحمراء وإنما عن الأوزون وهو الأكسجين ثلاثى الذرة والذى يتكون من الأكسجين ثنائى الذرة تحت تأثير الإشعاع القادم من «النجم الأب» الذى يدور الكوكب فى فلكه. يترك الأوزون بصمة واضحة كما هو مبين فى شكل ٧–٧ وتقع هذه البصمة بين بصمتى ثانى ميثيل الكبريتيد. إذا سجل تلسكوب مثل هذه الصورة لكوكب يدور حول نجم ما فهذا دليل عل وجود عمليات تخفض الأنتروبية، ويكون هناك احتمال قوى لوجود حياة على مثل هذا الكوكب، ودون سفر إنسان إلى هذه الآماكن ساحقة البعد، ودون مغادرة المجموعة الشمسية.



شكل (٧–٧): نموذج لمنظر طيف الأرض بالنسبة لتلسكوب في الفضاء من مسافة ٣٠ سنة ضوئية إذا سجل تلسكوب مثل هذه الصورة لكوكب يدور حول نجم ما فهذا دليل على حدوث نقص فى الانتروبية مما يشير إلى احتمال وجود «حياة» على هذا الكوكب.

هذا هو أفضل مثال نعرفه عن كيف تمثل البساطة العميقة أساس عمل الكون. إن أعقد مخلوقات فى هذا الكون هو نحن أنفسنا. تتكون هذه المخلوقات شديدة التعقيد من نفس المواد الخام المعتادة المعروف وجودها فى مجرة مثل درب التبانة. حينما تتكون على شكل أحماض أمينية، ترتب نفسها فى منظومة تترتب بنفسها حيث تسبب أسباب بسيطة فى تعقيدات سطحية، مثل تلك المتمثلة فى الفهد والنقاط المطبوعة على جلده. تؤول عملية البحث عن الحياة فى الكون إلى طرق بسيطة مثل البحث عن الأكسجين، وإن كانت تحتاج إلى تقنيات متطورة. هنا يجتمع الشواش والتعقيد لتكون كونا عالى التنظيم يناسب ظهور حياة راقية كحياتنا. يصف ستوارت كاوفمان هذا بقوله «نحن فى بيتنا فى هذا الكون» لكن ذلك لا يعنى أن الكون صمم خصيصا لصالحنا، وإنما نحن الذين خلقنا على هيئة هذا الكون.

مطابع الدار الهندسية/القاهرة
تليفاكس: ٥٤٠٢٥٩٨ محمول: ٠١٢٢٣٤٩٠١١